

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут"

ВІСНИК

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

**Серія: Проблеми удосконалення електричних машин
і апаратів. Теорія і практика**

№ 13 (1122) 2015

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 р.

Харків
НТУ "ХПІ", 2015

Вісник Національного технічного університету "ХПІ".

Збірник наукових праць. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 13 (1122). – 152 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською і російською мовами.

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" включено до "Переліку наукових Фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4. (Бюлєтень ВАК України № 6, 2010 р. стор. 3, № 20).

У квітні 2013 р. Вісник НТУ "ХПІ" Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodical Directory (New Jersey, USA).

Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Проблеми удосконалення електрических машин і апаратів. Теорія і практика індексується у наукометрических базах Index Copernicus, Российский Индекс Научного Цитирования – РИНЦ, Google Scholar та входить до баз даних DOAJ.

Координатори рада:

Л.Л. Товажнянський, чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І. Сокол, чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; С.Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В.В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В.І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П.Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В.А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; М.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор: Б.В. Клименко, д-р техн. наук, проф.

Заступник відповідального редактора: В.Ф. Болох, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар: І.С. Варшамова, асистент.

Члени редколегії: Є.І. Сокол, чл.-кор. НАНУ, д-р техн. наук, проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; В.І. Міліх, д-р техн. наук, проф.; Г.М. Сучков, д.т.н., проф.; В.Ю. Райнін, д-р техн. наук, проф.

Рекомендовано до друку Вченого радио НТУ "ХПІ";

Протокол № 3 від 26.03.2015.

I.C. ВАРШАМОВА, асистент, НТУ "ХПІ"

О.Г. СЕРЕДА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

Н.Г. ФОНТА, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПІ"

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ
МЕРЕЖ ПОБУТОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ЗА РАХУНОК
ВИКОРИСТАННЯ КОМПЛЕКСНИХ КРИТЕРІЙ
СПРАЦЬОВУВАННЯ ЗАХИСНИХ АПАРАТІВ**

Показано необхідність і можливість підвищення надійності захисту електричних мереж побутового призначення за рахунок переходу до комплексних критеріїв спрацьовування захисту, сформованим із сукупності декількох параметрів електричного кола, що захищається. Підвищення надійності забезпечується як за рахунок розширення переліку аварійних ситуацій в електричній мережі, на які реагує захист, так і за рахунок підвищення показника безвідмовності роботи системи захисту в результаті реалізації режиму резервування відмов. Проаналізовано нові технічні рішення, що дозволяють формувати в режимі ковзного моніторингу різні типи комплексних критеріїв спрацьовування тих або інших видів захистів шляхом використання однакових, простих для обчислення і широко використовуваних в розцеплювачах вимикачів алгоритмів інтегрування квадратів дискретних значень струму.

Ключові слова: захист, електрична мережа, ковзний моніторинг, критерій спрацьовування.

Вступ. Надійність захисту електричних мереж, якщо розглядати цей термін як більш широке поняття, яке включає в себе декілька критеріїв, визначається не тільки показником безвідмовності роботи при виконанні конкретних захисних функцій, але і кількістю тих захисних функцій, які забезпечує система захисту.

Дійсно, в реальних електричних мережах, зокрема в електричних мережах побутового призначення, виникає досить велике число позаштатних ситуацій, які можуть призводити до тих чи інших негативних наслідків, тому, чим більше захисних функцій, що реагують на нештатні ситуації, має система захисту, тим вище надійність такого захисту. У той же час, очевидно, що якщо показник безвідмовності виконання захисних функцій невисокий, то і надійність захисту не може бути високою. Тому тільки поєднання розширення переліку захисних функцій і підвищення ймовірності безвідмовної роботи системи захисту дозволяє забезпечити сучасні, більш високі,

вимоги надійності захисту електричних мереж побутового призначення.

В даний час при захисті електричних мереж побутового призначення як і раніше широко використовуються автоматичні вимикачі з аналоговими електронними розчеплювачами, в яких, як правило, перелік захисних функцій обмежений захистом від струмів перевантаження і струмів короткого замикання (КЗ). Ні перелік існуючих в зазначених апаратах захистів, ні їх якість не дозволяють вирішити існуючі проблеми підвищення надійності захисту електричних мереж. Слід зазначити, що в нових серіях вимикачів, вже з мікропроцесорними розчеплювачами, в більшості зарубіжного виробництва, можливості мікропроцесорної техніки використовуються, в основному, для розширення інформаційно-вимірювальних і комунікативних функцій: фіксації величини аварійних струмів, кількості спрацьовування та інше. У той же час для більш глибокого аналізу процесів в електричних мережах шляхом безперервного моніторингу параметрів зазначених мереж, що характеризують аварійну ситуацію, можливості мікропроцесорної техніки використовуються не в повному обсязі.

Відсутність в існуючих автоматичних вимикачах всіх необхідних для надійного захисту електричних мереж видів захистів, зумовило розробку та реалізацію в цих мережах додаткових пристрій з тими видами захистів, яких немає в вимикачах. Так, наприклад, через відсутність в живильних мережах побутового призначення захисту від можливих перенапруг у споживачів при обриві нульового проводу розроблені і застосовуються прилади захисту релейні (ПЗР), в яких передбачено захист конкретного споживача від перенапруги понад 242 В [1].

Через відсутність у вимикачах захисту від віддалених КЗ і можливості реалізації режиму "далекого" резервування в Росії розроблені мікропроцесорні термінали БМРЗ-0,4 [2]. Вони встановлюються в КТП на додаток до вимикачів, в тому числі і з мікропроцесорними розчеплювачами (фірм ABB, Schneider Electric, Siemens), але не мають необхідних видів захистів. За допомогою терміналів БМРЗ-0,4 може бути вирішена проблема захисту від віддалених КЗ і режим далекого резервування. Аварійними параметрами режиму далекого резервування при захисті від віддалених КЗ в терміналах БМРЗ-0,4 є співвідношення між приростами активної і реактивної складових струму прямої послідовності. Ідентифікація за вказаними параметрами пускових струмів і блокування в цьому випадку максимального струмового

захисту, дозволяє підвищити чутливість захисту саме до струмів КЗ, і тим самим виконати одну з необхідних умов надійного резервування вищестоящим вимикачем нижчестоящого при відмові останнього.

Слід зазначити, що одне тільки збільшення чутливості до струмів КЗ розташованого вище у розподільній мережі вимикача, не дозволяє повною мірою використовувати можливості режиму резервування для підвищення надійності захисту. Щоб повною мірою домогтися підвищення надійності, необхідно забезпечити і малий час спрацьовування вищестоящого вимикача. Останнє важко забезпечити без застосування швидкодіючого селективного захисту, в якому немає навмисних затримок спрацьовування. А реалізація швидкодіючої селективного захисту неможлива без вирішення проблеми швидкого, ще на початковому етапі виникнення обурення кола, ідентифікації виду струму збурення за кількома параметрами захищаємого кола (діючого значення струму збурення, коефіцієнта потужності, виду струму збурення-2-х або 3-х фазне КЗ). Все вищевикладене відноситься до підвищення якості захистів від струмів міжфазних КЗ (захист "відсічення" – захист *I* і захист від КЗ – захист *S*).

Аналогічні проблеми швидкого визначення параметрів кола існують і для ідентифікації аварійних ситуацій в чотирьох провідній мережі з *N*-провідником. До захистів, які повинні реагувати на аварійні ситуації в колі з *N*-провідником, відносяться захист від обриву *N*-проводу (захист *N*), від однофазних КЗ на землю (захист *G*), від виникнення перенапруг у однофазних КЗ (захист *UN*).

Аналіз параметрів кола, необхідних для побудови захисту від обриву *N*-провідника, вже було розглянуто в роботі [3]. Однак у зазначеній публікації ця проблема розглядалася для електричних мереж з лінійними навантаженнями. Для мереж із значною часткою нелінійних навантажень, а таких з кожним роком стає все більше, побудови захистів без урахування такого параметра кола, як спектр гармонік струму, не може забезпечити високу ефективність таких захистів.

Мета цієї статті – показати, що забезпечення високої надійності захисту електричних мереж можливо тільки при використанні комплексних критеріїв спрацьовування, що враховують сукупність значень ряду параметрів кола, які найбільш повно характеризують ту чи іншу аварійну ситуацію в електричній мережі. До таких параметрів, сукупність значень яких повинні використовуватися при формуванні комплексних критеріїв спрацьовування тих або інших видів захистів, повинні бути не тільки діючі значення струмів збурення у фазах $\Delta I_{\phi(a, b, c)}$

і cosφ, а й діючі значення найбільш значущих гармонік струмів у фазах (I_1, I_3, I_5) і в N -проводі (I_{01}, I_{03}, I_{05}).

Інше завдання, яке вирішується у цій статті – дати наукове обґрунтuvання нових технічних рішень, що дозволяють, шляхом використання простих алгоритмів інтегрування квадратів дискретних значень струму, що відповідають різним частотам дискретизації вихідних аналогових залежностей струму від часу, швидко визначати параметри кола та формувати, на їх основі, комплексні критерії спрацьовування.

Комплексні критерії спрацювання захистів від міжфазних КЗ і методи їх формування. У технічному рішенні [4] визначення значення cosφ пропонується на підставі співвідношення максимального S_{\max} та мінімального S_{\min} значень силової функції кола $S(t)$ – залежно від часу суми квадратів миттєвих значень фазних струмів $i_{j(a,b,c)}^2$ симетричної трифазної системи:

$$S(t) = i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t). \quad (1)$$

Вираз силової функції представлений виразом (1) дозволяє визначити зазначену залежність $S(t)$, використовуючи фактичні миттєві значення струмів у фазах, одержувані від датчиків струму на виході АЦП. Аналітичний же вираз силової функції, який отримано в результаті підстановки в вираз (1) відомих залежностей для струмів в 3-х фазній мережі, після всіх перетворень має наступний вигляд:

$$S(t) = 3I_{\phi}^2 \left[1 - 2e^{-\frac{t}{T}} \cos \omega t + e^{-\frac{2t}{T}} \right], \quad (2)$$

де I_{ϕ} – діюче значення періодичної складової фазного струму симетричної трифазної системи, T – постійна часу кола, що визначає cosφ.

Зіставлення знайденої по дискретним значенням фазних струмів $i_{j(a,b,c)}^2$ залежності силової функції $S(t)$ з її аналітичним виразом дозволяє, використовуючи особливості силової функції, швидко (не чекаючи завершення переходного процесу зміни струму) і точно (без похиби, обумовленої впливом випадкової фази виникнення струму збурювання на його величину) визначити значення cosφ.

Оскільки мінімальне значення функції S_{\min} досягається тільки протягом другого напівперіоду струму, час визначення значення cosφ становить близько 20 мс. Такий час цілком припустимий для ідентифікації за величиною cosφ віддаленого КЗ – значення cosφ повинно бути не більше 0,5 ($\cos\phi \leq 0,5$). Але мале значення cosφ можливо і у випадку, якщо КЗ в електричному колі сталося на

відвідних затискачах вимикача, розташованого поблизу живильного трансформатора тобто коли має бути реалізований захист "відсічення" – захист I. Тому, в загальному випадку, для швидкої і надійної ідентифікації різних видів міжфазних КЗ необхідні комплексні критерії спрацьовування, які, враховуючи і реалізацію захисту "відсічення", повинні визначатися досить швидко.

Зменшити час визначення значення $\cos\phi$ до 10 мс можна, якщо використовувати не обидва екстремальних значень S -функції, а тільки максимальне значення S_{max} .

На рис. 1 наведені залежності силової функції $S(t)$ для двох значень $\cos\phi$: 0,3 і 0,7. Як видно з рисунка, графіки залежностей $S(t)$ та їх екстремальні значення найбільшою мірою відрізняються в інтервалі (0-10) мс. Тому, як показав аналіз, співвідношення інтеграла силової функції $S(t)$ в інтервалі часу (0-10) мс до її максимального значення S_{max} , (див. рис. 1), а це не що інше, як співвідношення суми інтегралів Джоуля всіх фаз до максимального значення вказаної суми, є досить значимим показником для визначення значення $\cos\phi$.

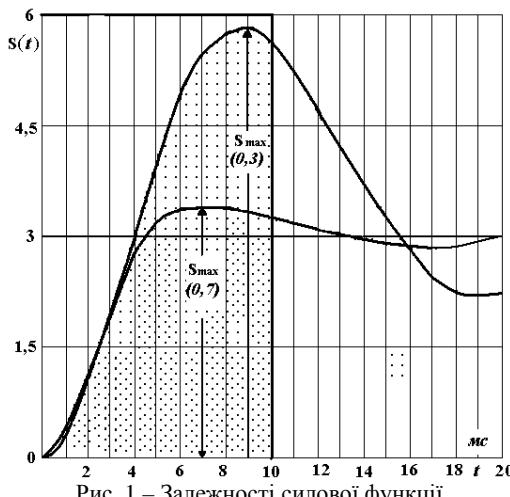


Рис. 1 – Залежності силової функції

Після того, як визначено значення $\cos\phi$, неважко обчислити і діюче значення струму I_ϕ з виразу, яке однозначно пов'язане з коефіцієнтом ударності кола K_y виразом:

$$S_{max} = 3 \Delta I_\phi^2 \cdot K_y^2, \quad (3)$$

де K_y – коефіцієнт "ударності" струму в трифазній електричній мережі, залежність якого у функції cosφ наводиться в довідковій літературі.

Наведена методика визначення параметрів мережі має такі переваги:

– дозволяє використовувати один уніфікований, досить простий, математичний апарат для реалізації різних видів захистів, оскільки при побудові захисту від віддалених КЗ (захист S_1) і при побудові швидкодіючої селективного захисту (захист S_2) використовуються інтеграли Джоуля в кожній фазі і їх сума. Як буде показано нижче, такий само не складний математичний апарат інтегрування дискретних значень струму, але для різних інтервалів дискретизації, може бути використаний і при визначенні спектра гармонік струму;

– не потрібні додаткові датчики – напруги, реактивної потужності та інше, а, отже, і додатковий математичний ресурс для обробки додаткових вхідних сигналів;

– не потрібна затримка часу для того, щоб закінчилися переходні процеси, викликані струмом збурення мережі, з тим, щоб точно визначити діюче (устале) значення струму, реактивну потужність і інше.

За сукупністю значень трьох параметрів кола (ΔI_ϕ , cosφ, і тип міжфазного КЗ) можуть бути ідентифіковані наступні види струму обурення:

– пусковий струм, якщо cosφ = 0,2-0,4 і $\Delta I_\phi \geq I_{sd}$, де I_{sd} – струмова уставка з урахуванням можливості нормального пуску електродвигунів;

– віддалене трифазне КЗ, якщо cosφ = 0,6-1,0 і $\Delta I_\phi \geq I'_{sd}$, де I'_{sd} – струмова уставка віддаленого КЗ або режиму резервування;

– трифазне міжфазне КЗ на відвідних затискачах вимикача, якщо $\Delta I_\phi \geq I_i$, де I_i – струмова уставка "відсічення".

На рис. 2 наведено фрагмент блок-схеми роботи мікропроцесорного пристрою розцеплювача при реалізації захисту від міжфазних КЗ з використанням комплексних критеріїв спрацьовування захисту. Залежно від сукупності значень трьох параметрів електричного кола, що захищається (ΔI_ϕ , cosφ і типу міжфазного КЗ), в логічних модулях "I"- "I" формуються три комплексних критерії, у відповідності з якими виробляються необхідні керуючі сигнали на виконавчий елемент захисту.

У модулі 1 визначаються значення інтегралів Джоуля для струмів збурення у фазах – Q_a ; Q_b і Q_c .

У модулі 2 на основі порівняння поточних значень інтегралів Джоуля в фазах визначається вид струму збурення – 2-х або 3-х фазний.

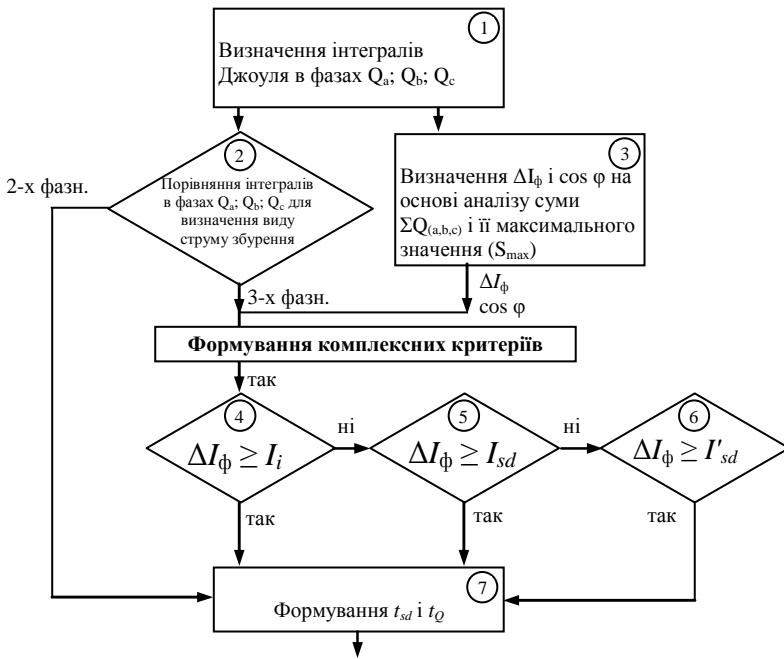


Рис. 2 – Фрагмент блок-схеми роботи мікропроцесорного пристрою розцеплювача

У модулі 3 на підставі аналізу поточних значень суми інтегралів Джоуля $\sum_0^t Q_{(a,b,c)}(t)$, тобто силової функції $S(t)$, і максимального її значення S_{\max} визначаються значення ΔI_{ϕ} , cosφ і тип міжфазного КЗ. У модулях 4, 5 і 6 по сукупності значень трьох параметрів електричного кола, що захищається (ΔI_{ϕ} , cosφ і тип міжфазного КЗ), формуються комплексні критерії спрацьовування захисту і відповідний керуючий сигнал на виконавчий елемент.

Оскільки параметри кола при пуску електродвигуна не відповідають жодному з трьох сформованих комплексних критеріїв, захист на пусковий струм не реагує.

Комплексні критерії спрацьовування захистів від аварійних ситуацій, зумовлених обривом N-проводу. Крім проблем із захистом від міжфазних КЗ, в реальних мережах побутового призначення існують проблеми із захистом від інших аварійних ситуацій. До захистів, обумовлених обривом N-провода, відносяться захисти від

обриву N -проводу (захист N) і від можливих перенапруг у однофазних споживачів (захист UN).

При побудові зазначених захистів, як це було розглянуто в [2], критерієм обриву N -провода, по своїй технічній суті, служить результат порівняння "штатного" та аварійного "образів" електричного кола. При цьому фізичним еквівалентом "штатного образу" кола виступає очікуване значення струму в N -провіднику, а еквівалентом аварійного "образу" кола – фактичне значення струму в N -провіднику – I_0' .

Під очікуваним струмом I_0' розуміється таке значення струму, яке має бути при непошкодженню N -провіднику. Значення очікуваного струму I_0' визначається як сума трьох векторів фазних струмів:

$$I_0' = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c. \quad (4)$$

У непошкодженій електроустановці кути між векторами фазних струмів складають, практично 120° , навіть при наявності несиметрії. Тому, якщо фазні струми синусоїдальні, визначення струму I_0' з рівняння (4) не становить труднощів.

Але у випадку нелінійних навантажень, коли фазні струми несинусоїдальні і в результаті спотворення кривої фазних струмів, крім першої, з'являються більш високі гармоніки струму, визначення значення очікуваного струму I_0' , виходячи тільки з несиметрії фазних струмів, неможливо. Обумовлено це тим, що навіть у "штатному" режимі роботи кола (без обриву N -проводу) і при симетрії фазних струмів, в N -проводі будуть протікати, у ряді випадків досить значні, струми 3-ї гармоніки. Тому, при наявності в мережі нелінійних навантажень, а значить, і наявності в фазах струмів 3-ї гармоніки I_3 , при аналізі величини очікуваного струму в N -проводі необхідно, крім геометричної суми гармонік, некратних 3, враховувати і арифметичну суму струмів 3-ї гармоніки і гармонік кратних 3.

У реальних електрических мережах найбільш значущими за впливом на величину загального струму є три перші непарні гармоніки струму. У цьому випадку значення очікуваного струму в N -проводі I_0' може бути представлено наступному виразом:

$$I_0' = \sqrt{\left(\sum \vec{I}_{1(a,b,c)}\right)^2 + \left(\sum I_{3(a,b,c)}\right)^2 + \left(\sum \vec{I}_{5(a,b,c)}\right)^2}, \quad (5)$$

де $\vec{I}_{1(a,b,c)}$ и $\vec{I}_{5(a,b,c)}$ – комплекси струмів 1-ї і 5-ї гармонік, а $I_{3(a,b,c)}$ – модулі векторів струмів 3-ї гармоніки.

Таким чином, значення очікуваного струму являє собою досить

складний комплексний критерій, за яким оцінюється цілісність N -провідника в розгалуженій електричній мережі. Для його формування необхідно знати не тільки значення струмів у фазах, але і спектральний гармонійний склад цих струмів.

Існує досить багато методів визначення спектру гармонік будь-якого несинусоїdalного сигналу. Найбільш відомим є перетворення Фур'є. Для вирішення прикладних завдань, як правило, використовується дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). При використанні ДПФ безперервна функція, наприклад, залежність струму в часі $i(t)$, множиться на гратчасту дельта-функцію (δ -функцію), значення якої визначені тільки в дискретні моменти часу:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{при } t = 0, \\ 0 & \text{при } t \neq 0. \end{cases} \quad (6)$$

В результаті такого множення безперервна функція $i(t)$ перетворюється в дискретну функцію $i_d(t)$:

$$i_d(t) = i(t) \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \delta(t - n \cdot \Delta t_d) = \sum_{n=0}^{N-1} i(t) \cdot \delta(t - n \cdot \Delta t_d), \quad (7)$$

де N – число дискретних відліків, Δt_d – інтервал дискретизації.

Для спектрального аналізу з використанням ДПФ потрібна досить велика кількість математичних операцій множення, додавання і зведення у квадрат, оскільки для визначення величини навіть однієї з гармонік струму потрібно провести розрахунок всього спектру гармонік даного сигналу. Тому розроблені альтернативні методи дискретного перетворення Фур'є, що дозволяють визначати фіксовані гармоніки, без визначення всього гармонійного спектру.

Одним з таких альтернативних методів розкладання в ряди Фур'є є алгоритм Герцеля [6]. При його використанні, за рахунок реалізації ДПФ у вигляді так званого фільтра з безкінечною імпульсною характеристикою (БІХ-фільтра), спрощується розрахунок спектра гармонік, а значить, помітно зменшується число необхідних математичних операцій. Однак, і в разі застосування алгоритму Герцеля, для безперервного моніторингу гармонійного складу струму потрібен досить значний ресурс мікропроцесора по швидкодії, а значить і за вартістю.

Для можливості швидкого ковзного моніторингу спектра гармонік сигналу розроблений метод, який названий модифікованим алгоритмом Герцеля [7]. Метод дозволяє перерахунок значення однієї гармоніки, знайденої на попередньому часовому кроці ковзання, в значення цієї ж гармоніки при наступному кроці ковзання, що знижує

вимоги до ресурсу мікропроцесора за його швидкодії. Однак, як свідчить досвід, вищевказані методи все ж є надто складними і надлишковими для пристройів захисту. Тому більш доцільним представляється використовувати метод, спеціально розроблений для конкретної задачі визначення значень тільки перших трьох непарних гармонік фазного струму. Суть пропонованого методу визначення спектру гармонік полягає у спільному використанні результатів розрахунків діючих значень струму по дискретним значенням, отриманих при трьох різних частотах дискретизації f_d вихідної аналогової залежності струму від часу – при $f_d = 750$ Гц; 500 Гц і 300 Гц. Для кращого розуміння пропонованого методу на рис. 3 наведені залежності від часу миттєвих дискретних значень несинусоїdalного струму $i(t)$, а також залежності зміни в часі значень струмів 1, 3 і 5-ї гармонік – $i_1(t)$, $i_3(t)$, $i_5(t)$, відповідно. Розглянемо, як впливає на величину діючого значення фазного струму I_ϕ частота дискретизації f_d , або відповідний інтервал дискретизації Δt_d .

При частоті дискретизації $f_d = 750$ Гц, яка в 3 рази більше частоти 5-ї гармоніки, відповідно до вимог ГОСТу на якість електроенергії [9], розраховане діюче значення струму буде повністю враховувати всі три гармоніки струму (1, 3 і 5-ю). У нижній частині рис. 3 для наочності обліку всіх 3 гармонік струму (I_1 , I_3 , I_5) у загальному струмі I_ϕ , показано перетин провідника, через який протикають струми всіх трьох гармонік. Для цього випадку, обчислена за дискретним значенням струму, величина діючого фазного струму визначається наступним виразом:

$$I_\phi = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} . \quad (8)$$

Величина діючого фазного струму I_ϕ по (8) включає в себе всі 3 гармоніки струму (I_1 , I_3 , I_5).

При частоті дискретизації $f_d = 500$ Гц, а ця частота в 2 рази більше частоти 5-ї гармоніки, якщо дійсні значення гратчастої δ -функції збігаються з моментом проходження струму п'ятого гармоніки через 0, як це і показано на рис. 3, то в чинному значенні фазного струму $I_{\phi 5}$ не буде врахована 5-а гармоніка струму I_5 . Факт відсутності у фазному струмі п'ятої гармоніки на рис. 3 показаний так, що відповідна 5-ї гармоніці частина перетину провідника залита чорним кольором. Для цього випадку, підрахована за дискретними значеннями струму, величина фазного струму $I_{\phi 5}$ включає в себе 2 гармоніки струму 1 і 3-ю (I_1 і I_3).

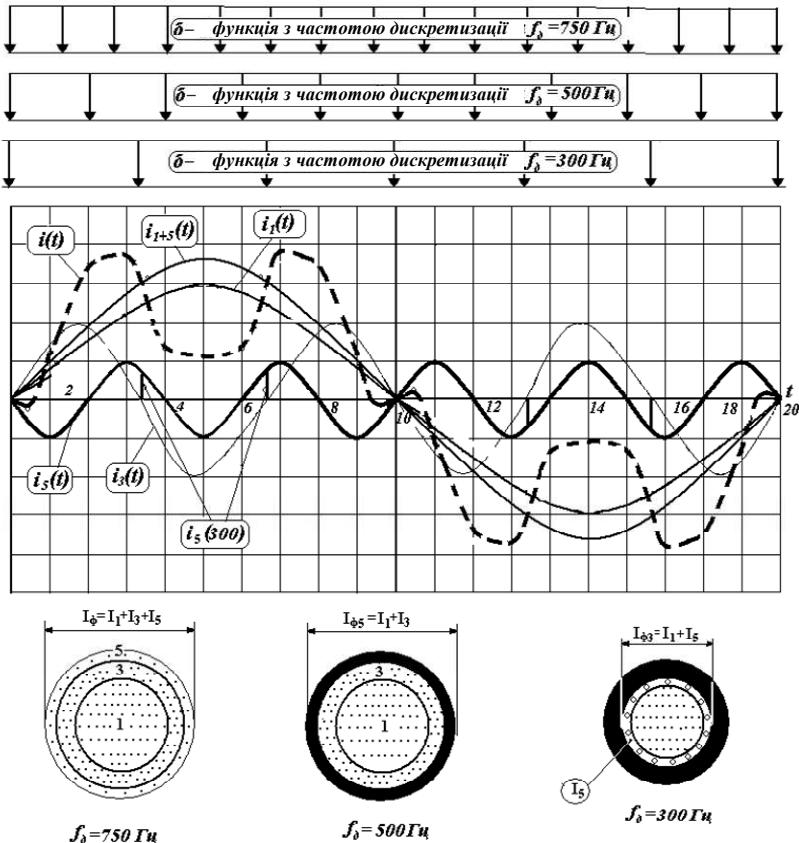


Рис. 3 – Гармоніки струму

При частоті дискретизації $f_d = 300 \text{ Гц}$, яка в 2 рази більшої частоти 3-ї гармоніки, у діючому значенні фазного струму $I_{\phi 3}$ не буде врахована 3-я гармоніка I_3 . Що стосується струму 5-ї гармоніки, то при частоті 300 Гц її точне відновлення по дискретним значенням неможливо, оскільки вказана частота є менше необхідної за ГОСТом на якість електроенергії [9].

На рис. 4 наведено залежності зміни струмів 1 і 5-ї гармонік у часі – $i_1(t)$ і $i_5(t)$, відповідно. Тут же показані дискретні значення струму 5-ї гармоніки, отримані при частоті дискретизації $f_d = 300 \text{ Гц}$ (відповідний інтервал дискретизації $\Delta t_d = 3,33 \text{ мс}$). Як видно з рисунка, в моменти проходження струму 3-ї гармоніки через 0, тобто коли гратчаста

δ -функція має дійсні значення, дискретні значення струму 5-ї гармоніки (відрізки 2 і 3) мають той же знак, що і дискретні значення струму 1-ї гармоніки. Це означає, що при частоті дискретизації 300 Гц, відновлена по дискретним значенням, відповідним $\Delta t_d = 3,33$ мс, залежність струму 5-ї гармоніки, по суті, трансформуються в залежність деякого фіктивного струму 1-ї гармоніки, величина якого визначається за дискретним значенням струму 5-ої гармоніки – струм $i_{1(5)}(t)$. Як показали розрахунки, діюче значення цього фіктивного струму дорівнює величині струму п'ятого гармоніки $I_{1(5)} = I_5$. Тому діюче значення струму $I_{\phi 3}$ слід визначати як суму двох векторів струмів 1-ї гармоніки тобто, якщо перейти до модулів зазначених векторів, то $I_{\phi 3} = I_1 + I_5$.

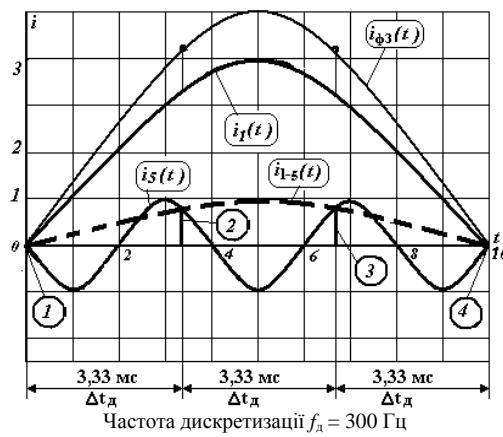


Рис. 4 – Залежності зміни струмів 1 і 5-ї гармонік у часі

Це є відображенням на рис. 4, де залежність фазного струму $i_{\phi 3}(t)$, відновленого за дискретними значеннями, відповідним частоті 300 Гц, показана з більшою амплітудою, ніж залежність струму 1-ї гармоніки $i_1(t)$.

З урахуванням вищевикладеного, метод розрахунку перших трьох гармонік струму зводиться до наступних простих арифметичних операцій з діючими значеннями фазного струму, підрахованих по дискретним значенням струму з частотами дискретизації $f_d = 750, 500$ і 300 Гц – струми $I, I_{\phi 5}$ і $I_{\phi 3}$.

Визначення діючого значення струму 5-ї гармоніки:

$$I_5 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_{\phi 5}^2}. \quad (9)$$

Визначення діючого значення струму 1-ї гармоніки:

$$I_1 = I_{\phi 3} - I_5. \quad (10)$$

Визначення діючого значення струму 3-ї гармоніки:

$$I_3 = \sqrt{I_{\phi}^2 - I_5^2 - I_1^2}. \quad (11)$$

Розглянутий вище метод спектрального аналізу нижніх, найбільш значущих для побудови захистів, гармонік є лише частиною алгоритму захисту від обриву N -провідника (захисту N) для правильної роботи якого потрібно формування комплексного критерію спрацьовування.

Як зазначалося раніше, при обриві N -провідника в будь-якому місці по довжині лінії з розподіленими навантаженнями ідентифікація аварійної ситуації проводиться по невідповідності фактичного способу мережі її "штатним" образом. Це означає, що для правильної спрацьовування захисту N необхідне формування досить складного комплексного критерію – очікуваного струму в N -провіднику I'_0 .

На рис. 5 наведено алгоритм формування такого критерію.



Рис. 5 – Алгоритм формування критерію

У модулі 1 з масиву дискретних значень фазних струмів $i_{j(a,b,c)}$ отриманих за рахунок множення вихідних аналогових залежностей струму від часу в фазах на гратчасту δ -функцію з частотою дискретизації $f_d = (2\text{-}4)$ кГц беруться дискретні значення, відповідні частотам дискретизації $f_d = 750; 500$ і 300 Гц.

У модулі 2 обчислюються діючі значення 1, 3 і 5-ї гармонік фазних струмів.

У модулі 3 обчислюється 1 гармоніка очікуваного значення струму в N -провіднику, як геометрична сума 1-х гармонік фазних струмів – I'_{01} .

У модулі 4 визначається 3-а гармоніка очікуваного струму в N -провіднику, як арифметична сума 3-х гармонік фазних струмів – I'_{03} .

У модулі 5 обчислюється 5-а гармоніка очікуваного струму в N -провіднику, як геометрична сума 5-х гармонік фазних струмів – I'_{05} .

У модулі 6 визначається комплексний критерій спрацьовування захисту – діюче значення очікуваного струму в N -провіднику:

$$I'_0 = \sqrt{(I'_{01})^2 + (I'_{03})^2 + (I'_{05})^2}. \quad (11)$$

У модулі 7 по дискретним значенням фазних струмів визначають фактичний струм в N -провіднику I_0 , який в модулі 8 порівнюється з очікуваним струмом I'_0 і, в разі аварійної ситуації, формується сигнал на спрацьовування захисту.

Слід зазначити, що для побудови іншого захисту, обумовленого пошкодженням N -провідника, а саме захисту від можливих перенапруг у однофазних споживачів (захисту UN) потрібно формування ще більш складного комплексного критерію. Адже для цього, як показано для електричних мереж без нелінійних навантажень [3], необхідно контролювати не тільки цілісність N -провідника, але і співвідношення величин фазних струмів в аварійній частині мережі. А оскільки в фазних струмах аварійної частини мережі, де пошкоджений N -провідник, не буде струмів 3-ї гармоніки, при формуванні комплексного критерію спрацьовування захисту UN без аналізу спектру струмів в аварійній частині обйтися не можна.

Крім того, при побудові захисту мереж з нелінійними навантаженнями від інших аварійних ситуацій, не обумовлених порушенням цілісності N -провідника, потрібно формування комплексних критеріїв, що включають в себе не тільки величини фазних струмів, але і їх спектральний склад. Так, наприклад, при

лінійних навантаженнях як критерій спрацьовування захисту від однофазних КЗ на землю (захисту G) прийнято використовувати величину струму в N -провіднику, тому у непошкоджений мережі він викликаний несиметрією фазних струмів і, зазвичай, не перевищує (10-20) % робочого фазного струму. Однак, у випадку нелінійних навантажень, захист G , що реагує тільки на величину струму в N -провіднику, не може бути ефективним. Адже третя гармоніка фазних струмів підсумовуються в N -провіднику навіть при симетричному навантаженні. Тому навіть у штатному режимі з нелінійними навантаженнями величина струму в N -провіднику може бути навіть більше величини робочого струму фази [10]. Тому для побудови надійного захисту від однофазних замикань мереж з нелінійними навантаженнями необхідна ідентифікація виду струму в N -провіднику (струм КЗ або струм навантаження). Не заглиблюючись в особливості побудови такого захисту, зазначимо, що для її реалізації необхідно формування комплексних критеріїв, які є певною сукупністю значень різних гармонік струму.

Висновки.

1. Показано, що для підвищення надійності захистів електричних мереж побутового призначення, включаючи мережі з нелінійними навантаженнями, необхідний перехід до комплексних критеріїв спрацьовування захисту, що включають в себе, крім величини струму інші параметри мережі, що захищається – діюче значення струму збурення кола, коефіцієнт потужності, спектральний склад струмів та ін.

2. Розроблено та запропоновано нові технічні рішення по надійному і швидкому формуванню комплексних критеріїв спрацьовування, необхідних для ідентифікації різних видів струму збурення – міжфазного короткого замикання, в тому числі і віддаленого, однофазного короткого замикання на землю, пуску електродвигуна, перевантаження, обриву N -проводу та ін.

3. Ідентифікація виду струму збурення дозволяє забезпечувати підвищення чутливості захисту до струмів КЗ, що, в сукупності з швидкодією захисту, включаючи і селективний захист, дозволяє повною мірою використовувати можливості режиму резервування для підвищення показника безвідмової роботи захисту. Це вигідно відрізняє пропоновані технічні рішення від тих, в яких підвищення чутливості не сполучається з швидкодією.

5. Перевагою пропонованих технічних рішень є також можливість визначення досить великої кількості параметрів мережі, що захищається, на підставі аналізу інформації тільки від датчиків струму,

без застосування додаткових датчиків напруги, реактивної потужності та інше.

6. Для визначення параметрів мережі, необхідних для формування комплексних критеріїв та ідентифікації з їх допомогою різних видів аварійних ситуацій, запропоновано простий у застосуванні математичний апарат, в основі якого лежить розрахунок квадратів дискретних значень фазних струмів, отриманих при різних частотах дискретизації, а також прості арифметичні операції з величинами, отриманими в результаті чисельного інтегрування зазначених вище дискретних значень струму. Це дозволяє реалізувати пропоновані технічні рішення не тільки в окремих додаткових пристроях до існуючих вимикачів, як, наприклад, в ПЗР або терміналах БМРЗ-0,4, але і в розчеплювачах самих вимикачів, для яких габаритні і вартісні вимоги до мікропроцесорних пристройів є більш жорсткими.

Список літератури: 1. ПЗР (Приборы защитные, релейные), <http://www.smont.ru/production/pzr.html>. 2. Езерский В.Г. Уникальная отечественная защита дальнего резервирования для сетей 0,4 кВ, не имеющая мировых аналогов, http://market.elec.ru/nomer/8/zashita_setei/ "Электротехнический рынок" / № 2 (8) февраль 2007 / Статьи и обзоры оборудования. 3. Байдя Е.И., Гапоненко Г.Н., Кобозев А.С. Защита однофазных потребителей от перенапряжений при обрыве нулевого провода / Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – №1. 4. Пат. 81981 України МПК Н 02 Н 7/00, Н 01 Н 73/00 Система захисту розгалужених трифазних електрических кіл від струмів віддалених коротких замикань / Г.М. Гапоненко, В.В. Омельченко, О.С. Кобозев. – №а200604596. Заявлено 25.04.2006; Опубл. 25.02.2008, Бюл. №4. 5. Климов В.П., Москалев А.Д. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания, <http://www.tensy.ru/article01.html>. 6. Алгоритм Герцеля (Goertzel algorithm). Теория и практика цифровой обработки сигналов, <http://www.dsplib.ru/content/goertzel/goertzel.html>. 7. Динамический пересчет спектральных отсчетов на каждом такте дискретизации. Модифицированный алгоритм Герцеля", <http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>. 8. Теорема Котельникова-Шеннона, www.graphicon.ru/oldgr/courses/cg_el00/kotelnikov.pdf. 9. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 10. Григорьев О.А., Петухов В.С., Соколов В.А., Красилов И.А. Влияние "компьютерных" нагрузок на работу электрических сетей зданий / Connect Мир связи!, 2002. – № 12.

Bibliografiy (transliterated): 1. Pribory zashhitnye, releyjnye (PZR). ZAO «SPNP «ShhITMONTAZh». 2015. Web. 15 January 2015 <<http://www.smont.ru/production/pzr.html>>. 2. Ezerskij V.G. Unikal'naja otechestvennaja zashhita dal'nego rezervirovaniija dlja setej 0,4 kV, ne imejushhaja mirovyh analogov. "Elektrotehnicheskij rynok". 2 (8) February 2007. Web. 15 January 2015 <http://market.elec.ru/nomer/8/zashita_setei/>. 3. Bajda E.I., Gaponenko G.N., Kobozev A.S. "Zashhita odnofaznyh potrebitelj ot perenaprjazhenij pri obryve nulevogo provoda". Elektrotehnika i Elektromekhanika. 1 (2010): 6-10. Print. 4. Pat. 81981 UA. Systema zakhystu rozhaluzhenykh tryfaznykh elektrychnykh kil vid strumiv viddalenykh

korotkykh zamykan. H.M. Haponenko, V.V. Omel'chenko, O.S. Kobozyev. № a200604596. 25.02.2008. Print. **5.** Klimov V.P., Moskalev A.D. Problemy vysshih гармоник в современных системах явлений. Web. <<http://www.tensy.ru/article01.html>>. **6.** Алгоритм Герцеля (Goertzel algorithm). Теория и практика цифровой обработки сигналов. Web. <<http://www.dsplib.ru/content/goertzel/goertzel.html>>. **7.** Динамический расчет спектральных оценок на каждом такте дискретизации. Модифицированный алгоритм Герцеля. Web. <<http://www.dsplib.ru/content/goertzelmod/goertzelmod.html>>. **8.** Теорема Котельникова-Shannon'a. Web. <http://www.graphicon.ru/oldgr/courses/cg_el00/kotelnikov.pdf>. **9.** GOST 13109-97. *Jelektricheskaja jenergiya. Sovmestimost' tehnickikh sredstv elektromagnitnaja. Normy kachestva elektricheskoy jenergii v sistemah elektrosnabzhenija obshhego naznachenija.* 1999. Print. **10.** Grigor'ev O.A., Petuhov V.S., Sokolov V.A., Krasilov I.A. "Vlijanie "komp'juternyh" nagruzok na rabotu elektricheskikh setej zdaniy". *Connect Mir svjazi!* 12 (2002).

Надійшла (received) 02.02.2015



Варшамова Ірина Сергіївна, асистент кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Захистила диплом магістра зі спеціальності електричні машини і апарати в 2006 р.

Наукові інтереси пов'язані з дослідженням проблем енергозбереження та фізичними полями електричних апаратів.



Середа Олександр Григорович, кандидат технічних наук, доцент кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Наукові інтереси пов'язані з дослідженням проблем захисту електричних мереж та енергозбереження в електричних апаратах.



Фонта Наталія Григорівна, кандидат технічних наук зі спеціальності "Інформаційні технології". Доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних систем керування. Стаж викладацької роботи – з 2006 р. Наукових публікацій більше 25.

Наукові інтереси пов'язані з системним аналізом і автоматизацією управління складними об'єктами.

УДК 681.58: 681.32

В.С. ВИГОВСЬКИЙ, студент, НТУ "ХПІ"
Ю.С. ГРИЩУК, канд. техн. наук, проф., НТУ "ХПІ"

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ ЖИВИЛЬНИМИ НАСОСАМИ ЕНЕРГОБЛОКУ ПОТУЖНІСТЮ 200 МВТ

Проведено огляд і аналіз систем керування і релейного захисту та технічних вимог до них. Обґрунтована можливість заміни релейної системи керування на автоматизовану систему на базі мікроконтролера MK51. Розроблена структурна схема автоматизованої системи керування живильними насосами енергоблоку та вибрані її елементи. Побудовано алгоритм роботи схеми автоматизованої системи керування роботою живильних насосів та їх захистом.

Ключові слова: енергоблок, живильні насоси, автоматизована система керування, мікроконтролер

Вступ. Більша частина електроенергії виробляється на теплових конденсаційних електрических станціях (ТЕС). Все основне та допоміжне обладнання призначено для перетворення хімічної енергії палива в теплову енергію пари, потім в механічну енергію обертання роторів турбіни та генератора та, нарешті, в електричну, яка віддається споживачеві. До основного обладнання енергетичного блоку відносять паровий котел, парова турбіна, генератор змінного струму та підвищуючий трансформатор [1].

Сучасні електростанції забезпечуються релейним захистом обладнання на основі комутаційних реле на основі РП-24-26, більша частина з яких вже морально та фізично застарілі та не відповідають сучасним вимогам для забезпечення безперебійного та якісного відпуску електроенергії. З часом вимоги до АВР розгалужуються та зростають, стимулюючи появу нових схем реалізації автоматичного включення резерву. Завдяки цьому останніми роками з'явилися АВР на мікроконтролерній елементній базі. Так за допомогою програмованих реле вдалося створити уніфіковану систему автоматичного включення резервного живлення, яка відповідає сучасним вимогам автоматизації, модульності та комунікації.

Важливу роль в роботі енергоблоку виконують живильні насоси, що подають воду до котлоагрегату і короткочасна (на 10-30 с) перерва в роботі яких може привести до аварії.

Метою даної роботи є розробка структурної схеми автоматизованої мікроконтролерної системи керування для

© В.С. Виговський, Ю.С. Грищук, 2015

забезпечення безперебійної роботи живильних насосів енергоблоку потужністю 200 МВт та алгоритму її роботи.

Теплова схема енергоблоку. На рис. 1 показана принципова теплова схема блоку 200 МВт [1, 2]. У паровому котлі з води виробляється пар високого тиску, який потім у пароперегрівачі перегрівається до температури 550 °C і поступає в паропровід. Цей пар, званий свіжим (гострим) паром, направляється до циліндра високого тиску, де віддає частину своєї енергії на обертання ротора турбіни. Після цього поступає до промперегріву, вертається до парогенератора, де отримує додаткову енергію.

Після вторинного перегріву пар поступає до цилінду середнього тиску (ЦСТ), а потім до цилінду низького тиску (ЦНТ). Далі відпрацьований пар з ЦНТ, який має тиск приблизно 0,035 кгс/см² та температуру насищення 26,4 °C, поступає до конденсатора.

У конденсаторі відпрацьований пар, стикаючись з більш прохолоднішою поверхнею трубок, через які прокачується охолоджуюча вода, конденсується й перетворюється у воду. Конденсат насосами прокачується до деаератора, через систему підігрівачів низького тиску. З аккумулюючого бака деаератора вода, позбавлена неконденсуючих газів, живильними насосами подається до котлоагрегату, через систему підігрівачів високого тиску (ПВТ).

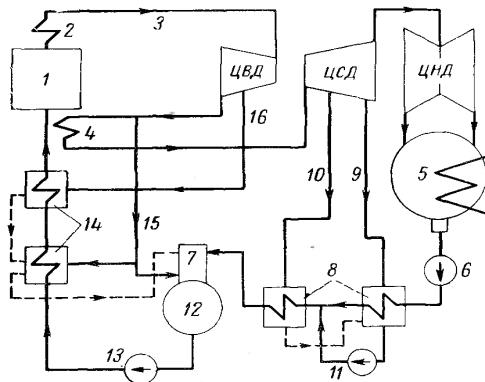


Рис. 1 – Принципова теплова схема блоку 200 МВт

- 1 – паровий котел, 2 – пароперегрівач, 3 – паропровід свіжого пару,
- 4 – проміжний пароперегрівач, 5 – конденсатор, 6 – конденсатний насос,
- 7 – колонка деаератора, 8 – підігрівачі низького тиску, 9, 10 – отбори пари з ЦСТ, 11 – зливний насос, 12 – бак деаератору, 13 – живильний насос,
- 14 – підігрівачі високого тиску, 15 – отбори пари з ЦВТ.

Живильні насоси. Живильні насоси подають воду в котли. Навіть короткочасна (на 10-30 с) перерва в роботі цих насосів може привести до аварії котла. Тому для блочних котлів передбачається резерв за поживними агрегатами.

На випадок відключення працюючих живильних насосів або зниження тиску живильної води в магістральних трубопроводах з якої-небудь іншої причини передбачено автоматичне включення резервних (АВР) живильних насосів. Крім того, повинен забезпечуватися самозапуск цих насосів [1]. З часом вимоги до АВР розгалужуються та зростають, стимулюючи появу нових схем реалізації автоматичного включення резерву. Завдяки цьому останніми роками з'явилися АВР на мікроконтролерній елементній базі. Так за допомогою програмованих реле вдалося створити уніфіковану систему автоматичного включення резервного, яка відповідає сучасним вимогам автоматизації, модульності та комунікації.

На блоці для живлення котла водою встановлено три центробіжних електронасоси: два типу ЖЕ-430-200 та один ЖЕ-640-180. Насос ЖЕ-640-180 забезпечує живлення котлоагрегата водою при номінальному навантаженні. Інші два є резервними. Тому для забезпечення безперебійної роботи блока необхідно забезпечити швидкодіюче резервування насосів [1].

Приводом насосу служить трифазний асинхронний двигун АТМ-3580-8 потужністю 3800 МВт, напруга 6 кВ, з кількістю обертів 2980 об/хв та АТД-4000, потужністю 4000 МВт. Двигун з короткозамкненим ротором, закритий з замкненою циркуляцією охолоджуючого повітря [1].

Насос опирається на шість опорних підшипники-ковзання, з бабітною набивкою, з примусовим змащеннем. Кожен насос обладнаний індивідуальною маслоустановкою для примусового змащеннем підшипників. Маслоустановка включає в себе:

– робочий маслонасос типу ВКЛ-25, який встановлено на валу електродвигуна насосу, продуктивність якого складає 35000 л/год при тиску 4,5 кг/см².

– пусковий маслонасос типа ЕВН-25, з продуктивністю насосу – 35000 л/год при тиску 4,5 кг/см² та у якості приводу електродвигун потужністю 10 КВт, напругою 380 В, номінальним струмом 19,5 А, кількістю обертів 2890 об/хв [1].

Сумарне осьове зусилля від всіх робочих коліс багатоступінчастого насоса досягає декількох тонн. Розвантаження осьового зусилля в живильних насосах здійснюється за допомогою гідропяти, що обертається в окремій камері. До цього диску від останньої ступені, тобто майже під повним тиском насоса, підводиться через кільцеву

щілину вода. Зворотня сторона диска знаходиться під тиском, близьким до тиску на вході води в насос, так як камера гідропяти з'єднана трубою зі всмоктуючим патрубком насоса. Таким чином, по обидві сторони диска гідропяти виникає різниця тисків, яка створює силу, спрямовану проти осьового зусилля діючого на робоче колесо. В роботі диск гідропяти встановлюється на відстані 0,15-0,2 мм від шайби гідропяти, і між цими деталями весь час існує водяна плівка такої ж товщини. Цей зазор витримується автоматично, так як якщо б диск відійшов від шайби на більшу відстань, то через збільшення перерізу проходу води тиск перед диском впав би, урівноваження ротора порушилося і осьова сила робочих коліс рухала б ротор у бік всмоктування до тих пір, поки зазор між диском і шайбою не зменшиться до величини, при якій тиск води перед диском відновиться до потрібної величини. Якщо диск дуже близько підійде до шайби, то тиск перед ним зросте, зусилля гідропяти перевищить осьове зусилля робочих коліс і посуне ротор у бік гідропяти до відновлення потрібного зазору. Збільшення тиску у гідроп'яті означає збої у роботі всього механізму, тому щоб уникнути поломки всього насосу треба забезпечити захист на підвищення тиску у розгружаючій камері, тобто у гідропяти [1].

Для забезпечення безперебійної роботи живильних насосів автоматизована система керування повинна забезпечувати наведені нижче функції.

1. Захист від зниження тиску масла в системі змащення до 0,5 кг/см.
2. Захист від зростання тиску в гідропяти більш 8,5 атм.
3. При зростанні рівня в ПВТ до 3300 мм, вимкнення та заборона на пуск живильного насосу.
4. Зниження тиску у напорному патрубку до 130 атм., вимкнення ЖЕНа та увімкнення резервного.
5. Максимально-токове відсічення.
6. Захист від мінімальної напруги.
7. Захист при міжфазовому короткому замиканню.

Миттєво запустити резервний насос та зупинити працюючий у таких випадках:

- а) при появі диму з підшипників або двигуна;
- б) при появі диму, вогня або іскр з двигуна;
- в) при появі ударів або сторонніх металевих звуків в насосі, електродвигуні або з'єднувальних муфтах;
- г) при появі раптової сильної вібрації, більше ніж 50 мкм;
- д) при значному зниженні обертів, яке супроводжується гудінням й швидким нагрівом електродвигуна;
- е) при прориві фланцевого з'єднання на магістралі гарячої води;

- е) при різкому підвищенню температури будь-якого з підшипників до 70 °C;
- ж) при зниженні тиску масла на змащення перед підшипниками до 0,5 кг/см²;
- 3) при осьовому зсуві ротора насоса до 2 мм;
- і) при різкому збільшенні амперного навантаження електродвигуна;
- и) при запарюванні насоса, ознаки якого наступні: різке зменшення амперного навантаження електродвигуна, падіння тиску на нагнітанні насоса [1].

Автоматизована система керування живильними насосами. Виходячи з важливості забезпечення умов надійної роботи живильних насосів та необхідності контролю за станом примусового змащення підшипників доцільно відповідно до схеми примусового змащення підшипників живильних насосів розробити схему з розміщенням на ній датчиків контролюваних параметрів (рис. 2) та автоматизовану систему керування живильними насосами, застосувавши викладену в [3-7] автоматизовану систему керування технологічним процесом випробувань та досліджень (АСК ТПВ) із застосуванням однокристального мікроконтролера.

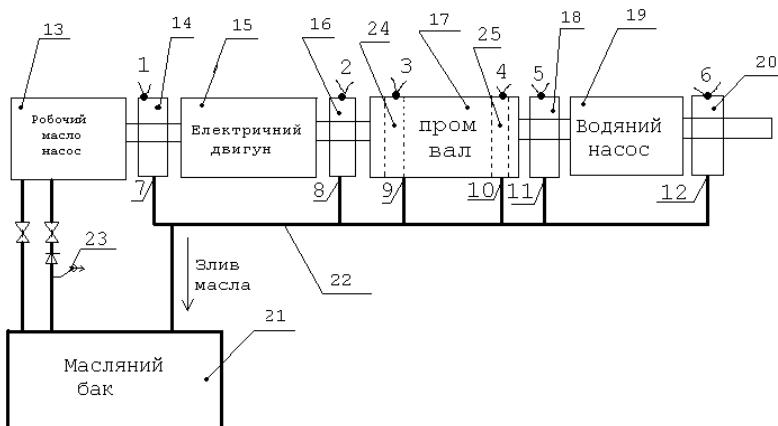


Рис. 2 – Схема примусового змащення підшипників живильних насосів та розміщення датчиків:

1-6 – датчики температури підшипників (термопарі); 7-12 – датчики температури масла на зливі з підшипників (термопарі); 13 – робочий масло насос; 14, 16, 18, 20 – підшипники; 15 – електричний двигун; 17 – промвал; 19 – водяний насос; 21 – масляний бак; 22 – маслопровід; 23 – датчик тиску масла для змащування підшипників насосу (манометр), 24, 25 – підшипники промвала.

Структурна схема. Для розробки автоматизованої системи керування живильними насосами пропонується структурна схема автоматизованої системи контролю 17-ти параметрів живильних насосів енергоблоку, яка подана на рис. 3, виконана на базі мікроконтролера і включає:

- датчики контролюваних параметрів Д1-Д17 (первинні перетворювачі): (струму та напруги двигуна – Д1, Д2; 6 датчиків температури підшипників(термопари) – Д6-Д8; 6 датчиків температури масла на зливі з підшипників Д9-Д14; датчик тиску масла на змащування підшипників Д15, датчик тиску води в напірному трубопроводі насоса Д16, датчик тиску води в гідроп'яті насоса Д17);
- нормуючі підсилювачі У1-У17;
- багатоканальний комутатор аналогових сигналів ;
- аналого-цифровий перетворювач типу К1113ПВ1;
- мікроконтролер, що містить вбудований генератор тактових сигналів, пам'ять команд, ОЗП, вбудовані 3 порти і послідовний канал зв'язку;
- компаратори К1-К17 типу К554 САЗ, виходи яких за "АБО" об'єднані з вихідними сигналами керуючого мікроконтролера,
- пристрой узгодження і обміну УСО1-УСО17, які включають виконавчі пристрой силової установки, що задають режим роботи, випробувань або досліджень.

Структурна схема АСК ТПВ, яка подана на рис. 3, виконана на базі мікроконтролера серії МК1816ВЕ51.

Через послідовний інтерфейс RS232C АСКТПВ з'єднана з ПЕОМ, яка може змінювати режими роботи, випробувань або досліджень, а також приймати, запам'ятувати, відображати і документувати значення контролюваних параметрів, та результати випробувань або досліджень.

До об'єкту дослідження (рис. 2) підключені відповідні датчики контролюваних параметрів Д1-Д17, які є первинними перетворювачами струму, напруги, або температури двигуна масляного насоса, тиску в напірному патрубку, тиску на гідроп'яті, тиску масла в системі змащування в напрузу. У якості датчиків температури можуть застосовуватися термопари. Наприклад, хромель-алюмельові термопари, які відрізняються невисокою вартістю, призначенні для вимірювання температури в діапазоні від -270 °C до +1372 °C. Чутливість цих термопар складає 41 мкВ/°C.

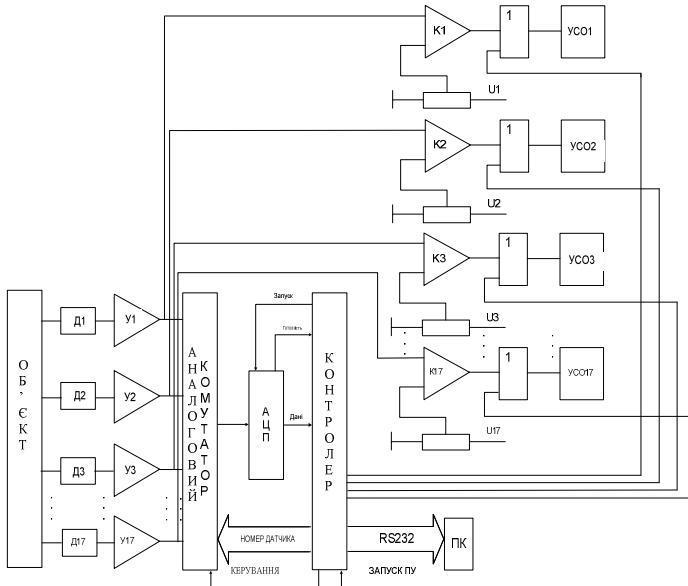


Рис. 3 – Структурна схема автоматизованої системи контролю 17-ти параметрів живильних насосів енергоблоку

Нормуючі підсилювачі погоджують вихідну напругу датчиків з необхідним вхідним сигналом АЦП 0-10 В і забезпечують низький вихідний опір. Комутатор аналогових сигналів перемикає один з входів на вихід залежно від керуючого коду, що надійшов від мікроконтролера.

АЦП є швидкодіючим десятирозрядним перетворювачем вхідної напруги в паралельний двійковий код. Запуск перетворювача проводиться мікроконтролером, закінчення перетворення викликає сигнал готовності, який є командою для зчитування даних. Мікроконтролер як мікропроцесорний пристрій, відповідно до записаної в пам'ять програми, керує процесом контролю, досліджень або випробувань, шляхом опитування із заданою періодичністю датчиків D1-D17, згідно з алгоритмом керування. Вихідні сигнали датчиків унаслідок їх різної фізичної природи можуть потребувати посилення і проміжного перетворення на АЦП або на схемах формувачів сигналів (ФС), які найчастіше виконують функції гальванічної розв'язки і формування рівнів двійкових сигналів стандарту ТТЛ.

Мікроконтролер з необхідною періодичністю оновлює керуючі слова на своїх вихідних портах. Деяка частина керуючого слова може інтерпретуватися як сукупність прямих двійкових сигналів керування (СК), що через схеми формувачів сигналів (підсилювачі потужності, реле, оптрони та ін.) або пристрой зв'язку з об'єктом (УСО1-УСО17) надходять на виконавчі механізми. Компаратори К1-К17 є паралельним апаратним контуром для захисту від аварійних режимів. УСО1-УСО17 є підсилювачами потужності, які керують виконавчими механізмами або пристроями силової установки.

Вибір мікроконтролера. Обґрунтування вибору мікро-процесорної системи проводиться виходячи із умов завдання яке необхідно вирішити.

Мікроконтролер для описаної вище системи вибирається виходячи з характеру наступних досліджуваних процесів і умов дослідження:

- швидкості протікання процесів;
- кількості досліджуваних параметрів і частоти опитування датчиків;
- завдань з переробки інформації;
- умов експлуатації і вимог щодо надійності.

Аналіз вихідних даних цього завдання показує, що його рішення може бути здійснено на базі мікроконтролера серії MK1816BE51 (MK51).

Система на базі цього мікроконтролера здатна опитувати датчики з частотою 100 мкс, тобто за час спрацювання $t_b \leq 10$ мкс система встигне опитати датчики 100 разів, чого цілком достатньо для зняття і побудови характеристик з необхідною точністю та забезпечення автоматизованого керування роботою живильних насосів та їх захисту.

Найбільш прийнятним для вирішення даного завдання є мікроконтролер типу MK1816BE51, що має наступні технічні показники:

- тип – паралельний;
- розрядність паралельно оброблюваної інформації – 8 двійкових розрядів;
- форма подання чисел – двійковий додатковий код;
- методи адресації – регістрова, пряма, непряма – регістрова, безпосередня;
- одиниця, що адресується, – байт;
- кількість команд – 111, включаючи команди арифметичних і логічних операцій, стекових операцій, складання слів двійкової довжини, операції керування;

- формат команд – однобайтова, двобайтова, трибайтова;
 - час виконання команд – 1-4 мкс;
 - 32 РОН і набір реєстрів спеціальних функцій;
 - 128 визначуваних користувачем програмно-керованих пропорів;
 - послідовний інтерфейс;
 - чотири 8-розрядні програмовані канали введення-виведення;
 - два 16-бітові багаторежимні таймери/лічильники;
 - система переривання з п'ятьма векторами і двома рівнями з програмною установкою пріоритету;
 - місткість внутрішнього ОЗП – 128 байт, ПЗП – 4 кбайт.
- Діалог з МК здійснюється за допомогою послідовного інтерфейсу RS-232C через ПЕОМ або пульт керування.

Важливою особливістю арифметико-логічного пристрою (АЛП) мікроконтролера сімейства MK51 є його здатність оперувати не тільки байтами, але і бітами. окремі програмно-доступні біти можуть бути встановлені, скинуті, інвертовані, передані, перевірені і використані в логічних операціях. Це дозволяє при керуванні об'єктами часто застосовувати алгоритми, що містять операції над вхідними і вихідними булевими змінними. АЛП являє собою паралельний 8-розрядний пристрій, що забезпечує виконання арифметичних і логічних операцій, а також операцій зсуву, обнулення тощо. АЛП може оперувати чотирма типами інформаційних об'єктів: булевими (біт), цифровими (4 біт), байтними (8 біт) і адресними (16 біт). У АЛП виконується 51 різна операція пересилки або перетворення цих даних. Оскільки використовується 11 режимів адресації (7 для даних і 4 для адрес), то шляхом комбінування "операція/режим адресація" базове число команд 111 розширяється до 255. В АЛП реалізується механізм каскадового виконання простих операцій для реалізації складних команд, наприклад таких, як команда умовної передачі керування за результатами порівняння.

Алгоритм роботи програми. Робота структурної схеми здійснюється по розробленому алгоритму і програмі. Алгоритм роботи схеми наведений на рис. 4.

Аналоговий сигнал з виходу комутатора поступає на АЦП який забезпечує перетворення його в цифровий код. Таке перетворення реалізовано найбільш швидкодіючим апаратним засобом на основі ВІС АЦП, що підключається до порту МК. Для проведення дослідження з необхідною точністю на початку програми константі TIME привласнюється значення інтервалу часу, через який опитуються датчики. Введення константі на початку програми необхідно для того,

щоб при зміні часу опитування у програміста на виникали складності у зміні тексту програми. Далі обнуляємо чотири порти мікроконтролера і перевіряємо чи включена система. Подальше виконання програми відбудуватиметься тільки тоді, коли на відповідний розряд порту мікроконтролера буде подано сигнал логічної "1".

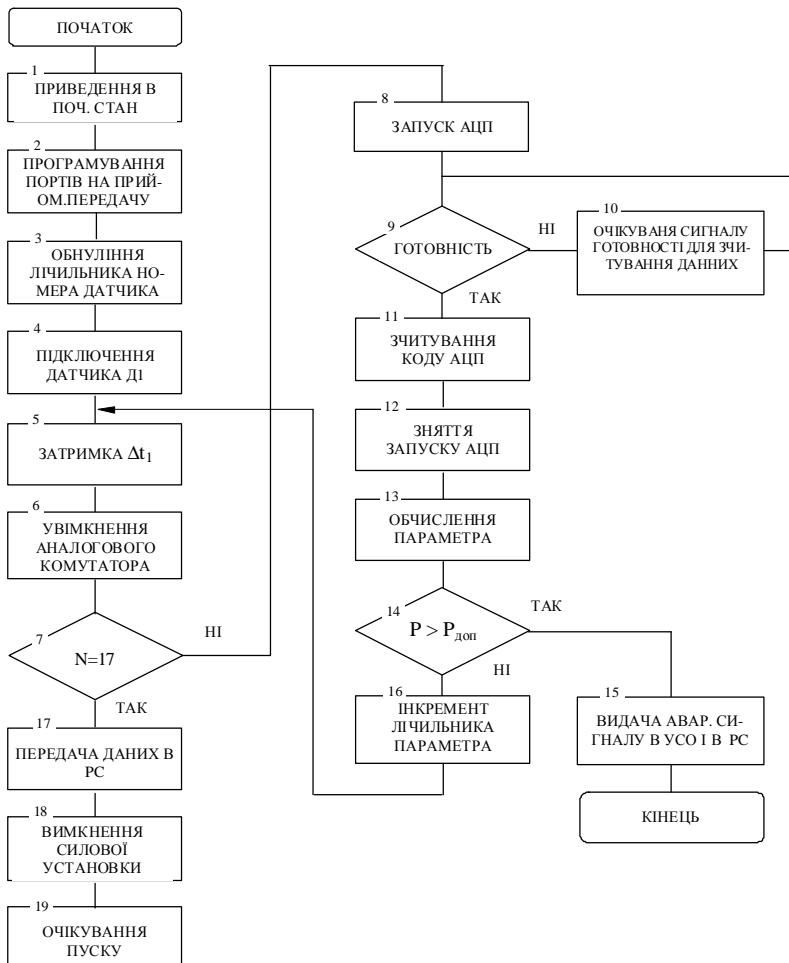


Рис. 4 – Алгоритм роботи схеми автоматизованої системи керування

При включені системи мікроконтролер посилає сигнал керування на аналоговий комутатор. Згідно одержаному сигналу комутатор підключає відповідний датчик наприклад (Д1) на вхід до АЦП.

Далі на АЦП подається сигнал запуску. Після зчитування і перетворення аналогового сигналу з датчика в двійковий код, АЦП посилає сигнал готовності на мікроконтролер. Данні прийняті з АЦП мікроконтролером обробляються видаються зовнішньому пристрою і через універсальний асинхронний приймач-передавач (УАПП) персональному комп'ютеру для подальшого зберігання та обробки.

В випадку, коли контролльований параметр Р перевищує допустиме значення $P_{\text{доп}}$ видається аварійний сигнал, що через схеми формувачів сигналів (підсилювачі потужності, реле, оптрони та ін.) або пристрой зв'язку з об'єктом (УСО1-УСО17) надходить на виконавчі механізми.

Висновки. Розроблена структурна схема та алгоритм роботи автоматизованої системи керування дозволяють автоматизувати процес контролю за роботою живильних насосів та їх захистом, суттєво скоротити терміни і витрати на проведення їх випробувань і досліджень, підвищити надійність роботи енергоблоку і його економічну ефективність.

Список літератури: 1. Кроль А.Я. Эксплуатация блочных турбинных установок большой мощности. Изд. 2-е, перераб. М. "Энергия", 1971. – 256 с. 2. Энергоблок мощностью 200 МВт Старобешевской ТЭС. Техническая информация. Реконструкция энергоблока ст. №5. Модернизация электрооборудования КРУ – 6 кВ. – Донецк, ПКО Донпромэнерго. 3. Шашин В.В., Урусов А.В., Мологонцева О.Ф. Проектирование цифровых устройств на однокристальных микроконтроллерах. – М.: "Энергоатомиздат", 1990. – 224 с 4. Башков Е.А. Аппаратное и программное обеспечение зарубежных микроЭВМ: учебное пособие. – К.: "Высшая шк.", 1990. – 207 с. 5. Элементы систем автоматического управления и контроля / Н.И. Подлесный, В.Г. Рубанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К: Вища шк., 1982. – 477 с. 6. Боборыкин А. В., Липовецкий Г. П., Литвинский Г. В., Оксинь О. Н. и др. Однокристальные микроЭВМ: Справочник. – М.: "МИКАП", 1994. – 400 с. 7. Щелкунов Н. Н. Дианов А. П. Микропроцессорные средства и системы. – М.: "Радио и связь". 1989. – 189 с. 8. Грициук Ю.С. Микропроцессорні пристрой: Навчальний посібник.– Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – 348 с.

Bibliografy (transliterated): 1. Krol', A.Ja. Jekspluatacija blochnyh turbinnyh ustanonovok bol'shoj moshchnosti. Moscow: Jenergija, 1971. Printn. 2. PKO Donpromjenergo. Jenergoblok moshchnost'ju 200 MVt Starobeshevskoj TJeS. Tehnicheskaja informacija. Rekonstrukcija jenergoblaka st. №5. Modernizacija jelektroborudovanija KRU – 6 kV. 3. Stashin V.V., Urusov A.V., Mologonceva O.F. Projekirovaniye cifrovih ustrojstv na odnokristal'nyh mikrokontrollerah. Moscow: Jenergoatomizdat, 1990. Print. 4. Bashkov E.A. Apparatnoe i programmnnoe obespechenie zarubezhnyh mikrojeVM. Kyiv: Vysshaja shk. 1990. Print. 5. Podlesnyj N.I., Rubanov V.G. Jelementy sistem avtomaticheskogo upravlenija i kontrolja.

Kiyv: Vishha shk. 1982. Print. 6. Boborykin A.V., Lipoveckij G.P., Litvinskij G.V. Oksin' O.N, i dr. *Odnokristal'nye mikrojeVM: Spravochnik*. Moscow: MIKAP. 1994. Print. 7. Shhelkunov N.N. Dianov A.P. *Mikroprocessornye sredstva i sistemy*. Moscow: Radio i svjaz. 1989. Print. 8. Hryshchuk Yu.S. *Mikroprotsesorni prystroi: Navchalnyi posibnyk*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2008. Print.

Поступила (received) 27.02.2015



Виговський Володимир Сергійович студент кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Наукові інтереси пов'язані з дослідженням електротехнічних установок з мікроконтролерним керуванням.



Грищук Юрій Степанович, канд. техн. наук, професор кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Наукові інтереси пов'язані з використанням методів мікроконтролерного керування в електричних апаратах, розробкою математичних моделей на основі теорії планування експериментів.

УДК 621.316

О.Г. ВОЛКОВА, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорожье

ТРЕБОВАНИЯ К КОНТАКТНЫМ МАТЕРИАЛАМ КОММУТАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Предложено перейти от использования в конструкциях сильноточных электрических аппаратов медных сплавов в качестве электроконтактных материалов на порошковые материалы. Представлен анализ состава порошкового материала и даны рекомендации по количественному составу легирующих компонентов в структуре медной матрицы. Отмечено, что сложное легирование медной порошковой матрицы проявляется эффектом синергетики, обусловленной каркасной структурой из легирующих компонентов, что придает образованным твердым растворам при достаточной пластичности более высокую прочность.

Ключевые слова: электрические контакты, порошковый материал, легирующий компонент, твердая смазка, электропроводность, теплопроводность.

Введение. Работа контактных пар коммутационных аппаратов сопровождается комплексом силовых и физико-химических воздействий, что приводит к изменению их формы и разрушению контактных поверхностей. Задача подбора материалов для контакт-деталей является основным направлением совершенствования работы коммутационных устройств. Как показывают результаты многочисленных исследований и практической эксплуатации литье сплавы на основе меди, традиционно используемые в качестве контактных материалов исчерпали свои возможности, особенно в конструкциях сильноточных аппаратов [1].

Анализ исследований. Известно, что методами порошковой металлургии, практически из тех же компонентов можно получить новые, обладающие более широким спектром эксплуатационных и технологических характеристик контактные материалы. Трудно найти такие литье материалы, которые обладали бы совокупностью свойств в полной мере удовлетворяющих требованиями современного электроаппаратостроения, а именно:

- высокое сопротивление механическому износу;
- высокое сопротивление электроизносу;
- высокая теплопроводность;
- высокая электропроводность;
- высокая коррозионная стойкость;
- низкое и стабильное во времени сопротивление;
- равномерная подача смазки в зону трения;

© О.Г. Волкова, 2015

- электропроводность продуктов износа;
- технологичность материала;
- низкое влияние на рабочую среду;
- использование одноименных пар трения;
- электропроводность пленок окислов;
- старение сплавов;
- отсутствие дорогостоящих компонентов.

Кроме того, что порошковые материалы дают возможность получить аддитивное объединение свойств составляющих их компонентов, при отсутствии их химического взаимодействия, они позволяют объединять в одной структуре металлические порошки с неметаллическими твердыми включениями.

Однако, сведения о процессах, происходящих внутри порошковых материалов и на их поверхностях носят ограниченный характер, сложность изучения этих процессов заставляет искать их аналоги в других отраслях металлургии и переносить их в область контактного материаловедения.

Цель работы. Выделить основные требования, предъявляемые к контактным материалам сильноточных коммутационных устройств на основе порошковых материалов, а также, провести поиск оптимального соотношения легирующих компонентов в медной матрице, что способно придать контактному материалу более высокие свойства жаростойкости и прочности.

Анализ влияния легирующих компонентов. Очевидно, что в качестве матрицы большинства составов порошкового элеконтактного материала используется порошок меди, которая, не являясь дорогостоящим материалом, обладает достаточно хорошей тепло- и электропроводностью. Основным недостатком меди в электроаппаратостроении относят низкую твердость и прочность особенно при высокой температуре. Известно, что эти недостатки удается снизить путем дисперсионного упрочнения легирующими элементами равномерно распределенными по матрице. При этом небольшое содержание упрочняющих фаз (не более 10%) существенно не влияет на электро- и теплопроводность меди, но повышает ее прочность. Наличие термостойких фаз таких элементов как Cr, Zr₂ в структуре порошкового материала повышает его электроэрозионную стойкость. Из [2] известно, что в порядке возрастания воздействия на разупрочнение медной матрицы, при нагреве, легирующие элементы можно расположить в следующей последовательности:



Таблица 1 – Исходный состав порошкового материала на основе меди

| Состав шихты | Качественные характеристики компонентов | Физико-химическое влияние компонентов | Количественный состав компонентов |
|---------------------|---|--|---|
| Медь | Электропроводность, относительная легкоплавкость | Адгезионная способность к легирующим компонентам | Все легирующие компоненты суммарно не должны превышать 10 % |
| Титан | Жаропрочность и горячая твердость, каркастность структуры, износостойкость, тормозящее действие разупрочнения | Повышение работы адгезии, стабилизирует атомы O, C, N | |
| Цирконий | Жаропрочность и горячая твердость, поглощение кислорода, блокирует рост оксидных пленок, каркастность структуры | Повышение работы адгезии, подавление окислительных процессов на контроле, упрочнение матрицы | |
| Хром | Каркастность структуры, тугоплавкость, жаропрочность, повышение износостойкости, карбидообразователь, препятствует разупрочнению сплава | Повышение жаропрочности и длительной твердости при высокой температуре | |
| Графит | Электропроводность, смазочное действие до 300°C, карбидообразователь, очищает границы зерен от внедрения окислов, снижает усадку при спекании | Предотвращает свариваемость медных контакт-деталей при больших токах | |
| Дисульфид молибдена | Смазочное действие до 1000°C, электропроводность | Повышает растворимость титана в меди | |

Замечено, что совмещение легирующих компонентов Ti, Zr, Cr в одном составе медной матрицы, способно вызвать образованию твердых растворов обладающих достаточной пластичностью и высокой прочностью. Это объясняется образованием каркасной структуры из легирующих компонентов и их карбидов в медной матрице. Наличие такой каркасной структуры приводит к перераспределению механических напряжений возникающих на поверхности и в теле контакт-детали. Считается, что такие материалы

испытывают эффект самоупрочнения при деформации, что приводит к поглощению энергии поступающий из зоны контактного взаимодействия [3]. В результате контакт-детали изготовленные из такого материала могут быть меньшего размера, а соответственно и меньшей массы при достаточно высокой прочности.

Твердые смазки, вводимые в состав порошкового материала, служат для снижения трения возникающего в зоне контактного взаимодействия, что дает возможность локализовать сдвиг поверхностных слоев на границе раздела твердая смазка и поверхность трения. В качестве твердой смазки в состав порошкового материала рекомендуется добавлять порошок графита и дисульфида молибдена [4].

Выводы. В результате анализа влияния легирующих компонентов на свойства контакт-деталей, изготовленных из порошкового материала, требования по количественному составу шихты порошкового материала могут быть представлены следующей табл. 1.

Более конкретно рекомендации по количественному составу шихты (матрица – медь, легирующие компоненты – Ti, Cr, Zr, C (графит) и MoS₂) можно получить в результате лабораторных испытаний в условиях близких к эксплуатационным.

Список литературы: 1. Розенберг В.М., Николаев А.К. Особенности медных малолегированных тепло- и электропроводных сплавов // Цветные металлы. – 1972. – №8. – С. 65-70. 2. Порошковая металлургия / Под. ред. Андриевского Р.А. – М.: Металлургия, 1983. – 519 с. 3. Портной К.И., Бабич Б.Н. Дисперсионно-упрочненные сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 195 с. 4. Либенсон Г.А. Производство порошковых изделий. – М.: Металлургия, 1990 – 238 с.

Bibliography (transliterated): 1. Rozenberg V.M., Nikolaev A.K. "Osobennosti mednyh malolegirovannyh teplo- i elektropravodnyh splavov". *Cvetnyemetally*. 8 (1972): 65-70. Print. 2. Andrievskogo R.A. *Poroshkovaja metallurgija*. Moscow: Metallurgija, 1983. Print. 3. Portnoj K.I., Babich B.N. *Dispersionno-uprochnennyespavy*. Moscow: Metallurgija, 1974. Print. 4. Libenson G.A. *Proizvodstvo poroshkovyh izdelij*. Moscow: Metallurgija, 1990. Print.

Поступила (received) 23.10.2014



Волкова Ольга Григорьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры "Теоретической и общей электротехники" Запорожского национального технического университета. Защищила диплом инженера, диссертацию кандидата технических наук, последнюю в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты в 2005, 2013 гг. соответственно. Научные интересы связаны с повышением надежности электрических разрывных контактов.

УДК 621.3

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, канд. фіз.-мат. наук, НТУ "ХПІ"

А.В. ТРОФІМОВ, студент, НТУ "ХПІ"

МЕТОДИКА СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНОГО АНАЛІЗУ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ІНДУКЦІЙНОЇ КУХОННОЇ ПЛИТИ ТА ПОСУДУ, ЩО НАГРІВАЄТЬСЯ

В статті запропонована методика чисельного аналізу теплових процесів в основних конструктивних елементах індукційних кухонних плит і у посуді, що нагрівається. Математична модель розподілу температурного поля в конструкціях, що розглядаються, представляє собою нестаціонарне рівняння тепlopровідності з граничними умовами, що описують конвективний теплообмін с оточуючим середовищем. Розрахунок виконується у двовимірній постановці методом скінчених елементів. У загальному випадку, враховуються залежності теплофізичних властивостей матеріалів від температури.

Ключові слова: індукційна кухонна плита, теплове поле, комп'ютерне моделювання, метод скінчених елементів.

Вступ. В роботах [1, 2] запропоновано інженерну методику розрахунку побутових індукційних кухонних плит, а також математичну модель та методику чисельного аналізу розподілу електромагнітного поля плити. Наступним кроком у комплексному дослідженні цього іновативного класу електропобутової техніки є комп'ютерне моделювання теплового стану конструкцій, що розглядаються, а саме розподілу температурного поля конструкції плити та, найголовніше, посуду, що нагрівається. Подальшим етапом розрахунків автори вважають комп'ютерне моделювання зв'язаних (мультифізичних) електромагнітних та теплових явищ, що мають місце в процесі роботи індукційних кухонних плит, з урахуванням їх взаємного впливу одне на інше.

Мета роботи – розробка математичної моделі та методики чисельного аналізу розподілу температурного поля індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається. Отримані результати комп'ютерного моделювання будуть проаналізовані в наступних роботах.

Математична модель теплових процесів в індукційних плитах та посуді, що нагрівається. Математична модель електромагнітних процесів в індукційних плитах розроблена та детально описана в [2]. За аналогією, побудуємо математичну модель теплових процесів, яка має наступні основні елементи:

© М.Г. Пантелейт, А.В. Трофімов, 2015

- основне рівняння, що описує явище або процес, що досліджується (в нашому випадку – розподіл температурного поля посуду, що нагрівається, а також конструктивних елементів індукційної кухонної плити)

- обґрунтовані припущення, що дозволяють спростити рівняння, що підлягає розв'язанню

- геометрія об'єкта, що досліджується (в нашому випадку – конструкція індукційної кухонної плити та посуду), та міркування, що дозволяють її спростити (наприклад, умови симетрії конструкції, що розглядається)

- початкові та граничні умови

- властивості матеріалів конструкції та їх нелінійні характеристики (у випадку індукційної плити – теплофізичні властивості: величини тепlopровідності, теплоємності та щільності та їх залежності від температури)

- величини, що характеризують сторонні джерела тепла (у випадку, що розглядається: розподіл внутрішніх джерел тепла електромагнітного походження, отриманий в результаті комп'ютерного моделювання розподілу електромагнітного поля [2])

Розглянемо послідовно побудову математичної моделі теплових процесів в індукційних кухонних плитах та посуді, що нагрівається.

1) Тепловий стан (розподіл температури у просторі та часі) конструкції у загальному випадку описується нестационарним рівнянням тепlopровідності [3, 4]

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) - \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T \right) = -Q, \quad (1)$$

де T – температура, що змінюється у просторі та у часі; λ – тепlopровідність матеріалу; ρ – щільність матеріалу; c_p теплоємність матеріалу; \mathbf{v} – вектор швидкості відповідного елемента конструкції; Q – потужність внутрішніх джерел тепла. У загальному випадку, величини λ , ρ та c_p (теплофізичні властивості матеріалів) залежать від температури.

2) Основні конструктивні елементи індукційної кухонної плити (індуктор, магнітопровід та посуд, що нагрівається) є нерухомими, отже рівняння (1) за відсутності "швидкісного" члена приймає вигляд:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -Q. \quad (2)$$

Математичне моделювання розподілу теплового поля індукційної плити доцільно розпочати у двовимірній постановці (як і у

випадку комп'ютерного аналізу електромагнітних процесів [2], значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів) у декартовій системі координат. Тоді рівняння (2), що підлягає розв'язанню, може бути записано наступним чином [5]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q. \quad (3)$$

Розподіл у просторі та у часі щільності теплових втрат (потужності внутрішніх джерел тепла) $Q(x,y,t)$ у електропровідних елементах конструкції вважається відомим за результатами розрахунку розподілу електромагнітного поля та щільності вихрових струмів $J_e(x,y,t)$ [2, 5]:

$$Q = \frac{|J_e|^2}{\gamma}, \quad (4)$$

де γ – питома електрична провідність матеріалу.

3) Розподіл електромагнітного поля індукційної кухонної плити визначається [2] стосовно її індукторної системи, що складається з наступних електропровідних та неелектропровідних елементів (рис. 1): індуктор 1; посуд, що нагрівається, 2; магнітопровід 3; діелектрик (повітря) 4.

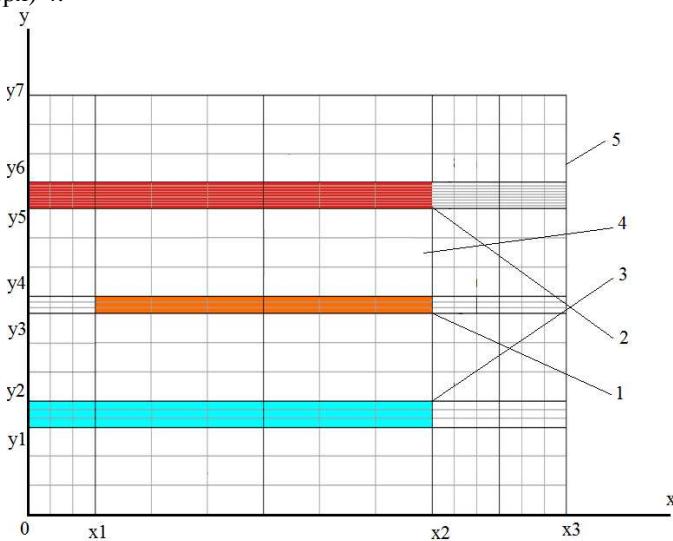


Рис. 1 – Розрахункова модель індукторної системи плити

Комп'ютерне моделювання теплового стану доцільно виконувати [5] у рамках єдиної обчислювальної процедури лише стосовно окремо кожного з електропровідних конструктивних елементів, а саме посуду 2 та магнітопроводу 3, виключаючи з розгляду суттєві за об'ємом діелектричні підобласті 4. Це дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати, необхідні для комп'ютерного розв'язання задачі. Можливо також виконати розрахунок температурного поля індуктора 1 в процесі роботи індукційної кухонної плити. Як і при розрахунках електромагнітних процесів, доцільно врахувати умови геометричної симетрії конструкції, а також симетричного розподілу теплового поля в ній: віссю симетрії є вертикальна вісь ординат Oy (див. рис. 1), отже розрахунок виконується лише для половини кожного з конструктивних елементів, що розглядаються. Це теж дозволяє значно заощадити потрібні обчислювальні ресурси.

4) Нестаціонарне рівняння у часткових похідних (3) розв'язується за наступними початковими умовами [3, 5]:

$$T(x,y,0) = T_0, \quad (5)$$

де T_0 – початкове значення температури (наприклад, кімнатна температура 20°C), як правило постійне по всьому перетину конструктивних елементів, що розглядаються.

Розглянемо граничні умови, за якими розв'язується рівняння (3). Оскільки, як було зазначено вище, комп'ютерний аналіз теплового стану виконується у рамках єдиної обчислювальної процедури лише стосовно окремо кожного з електропровідних конструктивних елементів, а саме посуду 2, магнітопроводу 3 та індуктора 1, виключаючи з розгляду діелектричні підобласті 4, граничні умови задаються окремо для кожного з конструктивних елементів (1, 2 та 3, див. рис. 1), що розглядаються:

- на вертикальній вісі ординат Oy : природні граничні умови симетрії [3, 5]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (6)$$

де n – зовнішня нормаль до вісі ординат Oy , отже умови (6) приймають вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (7)$$

Граничні умови (6), (7) задаються окремо для відповідних границь вісі ординат Oy (див. рис. 1) посуду [$y_5; y_6$], магнітопроводу [$y_1; y_2$] та індуктора [$y_3; y_4$] (у випадку відсутності внутрішнього отвору

в останньому, тобто якщо $x_1 = 0$).

• у випадку "суцільного" магнітопроводу, тобто якщо $y_1 = 0$, на горизонтальній вісі абсцис Ox для відрізка $[0; x_2]$: природні граничні умови симетрії [3, 5]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (8)$$

де n – зовнішня нормаль до вісі абсцис Ox , отже умови (8) приймають вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (9)$$

• на усіх інших границях посуду 2, магнітопроводу 3 та індуктора 1 з діелектричними (повітряними) підобластями 4, наприклад обидва відрізка $[0; x_2]$ (при $y=y_5$ та $y=y_6$) та відрізок $[y_5; y_6]$ при $x=x_2$ (див. рис. 1): граничні умови третього роду [3-5], що описують конвективний теплообмін електропровідної поверхні з оточуючим простором:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\infty}), \quad (10)$$

де λ – теплопровідність матеріалу відповідної електропровідної поверхні; n – зовнішня нормаль до поверхні, що розглядається; α – коефіцієнт теплообміну з зовнішнім середовищем, що суттєво залежить від виду та швидкості охолоджувача [3]; T_{∞} – температура зовнішнього середовища (охолоджувача). Величини α та T_{∞} задаються у вихідних даних окремо для кожної з граніць, що беруться до уваги в процесі виконання розрахунків.

5) Для чисельного розв'язання рівняння (3) потрібно задати у вихідних даних наступні теплофізичні властивості матеріалів посуду 2, магнітопроводу 3 та індуктора 1 (див. рис. 1) та їх залежності від температури: λ – теплопровідність матеріалу; ρ – щільність матеріалу; c_p – теплоємність матеріалу. Для виконання попередніх "оціночних" розрахунків можливо розв'язання лінійної задачі з постійними значеннями вказаних властивостей матеріалів.

6) При розв'язанні рівняння (3) в якості правої частини задається розподіл у просторі та у часі щільності теплових втрат (потужності внутрішніх джерел тепла) $Q(x,y,t)$ у електропровідних елементах конструкції (4), отриманий за результатами розрахунку розподілу електромагнітного поля та щільності вихрових струмів.

Методика чисельного розв'язання задачі. Сформульовану вище двовимірну задачу комп'ютерного моделювання розподілу теплового

поля конструкційних елементів побутових індукційних плит, що включає рівняння (3) з початковими умовами (5) та граничними умовами (6)-(10), доцільно розв'язувати добре розвинутим методом скінчених елементів [5]. При цьому використовується програмне забезпечення, розроблене раніше [5], або інші програмні продукти, призначені для розрахунку нестационарних теплових полів у дводимірній постановці.

Структура вихідних даних для виконання розрахунків. Для комп'ютерного моделювання розподілу теплового поля основних конструктивних елементів побутової індукційної плити, тобто для чисельного розв'язання рівняння (3) з початковими умовами (5) та граничними умовами (6)-(10) стосовно відповідних окремих розрахункових під областей 1, 2 та 3, зображеніх на рис. 1, у вихідних даних необхідно задати наступне:

- 1) геометричні розміри половини конструкції індуктора, посуду та магнітопровода окремо: x_1 , x_2 та y_1-y_6 (див. рис. 1)
- 2) теплофізичні властивості матеріалів посуду 2, магнітопроводу 3 та індуктора 1 (див. рис. 1) та їх залежності від температури: λ – тепlopровідність матеріалу; ρ – щільність матеріалу; c_p – теплоємність матеріалу; в якості приклада на рис. 2, 3 наведені залежності від температури теплофізичних властивостей алюмінію [4].

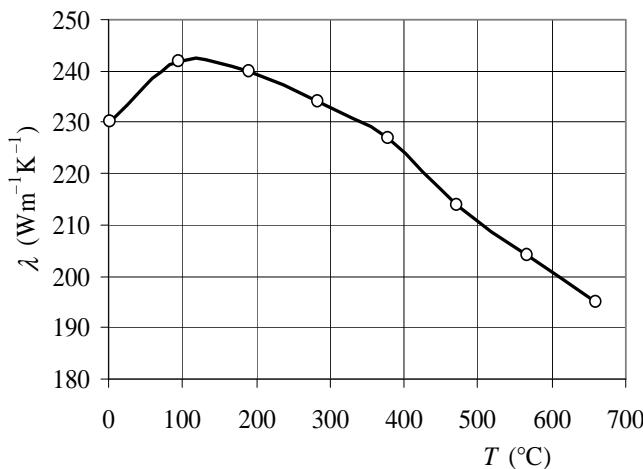


Рис. 2 – Залежність тепlopровідності алюмінію від температури [4]

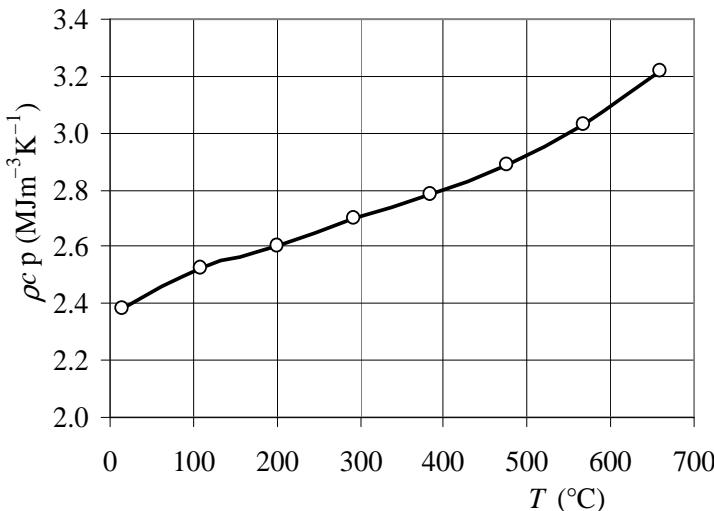


Рис. 3 – Залежність теплоємності алюмінію від температури [4]

3) розподіл у просторі та у часі щільності теплових втрат (потужності внутрішніх джерел тепла) $Q(x,y,t)$ у електропровідних елементах конструкції (4), отриманий за результатами розрахунку розподілу електромагнітного поля та щільності вихрових струмів [2]. При виконанні комп’ютерного моделювання потрібно організувати автоматичну передачу розподілу $Q(x,y,t)$ з програмного забезпечення, призначеного для розрахунку електромагнітних процесів (наприклад, [5, 6]), до відповідних процедур скінченоелементного аналізу розподілу температурного поля [5]. При цьому, величини щільності теплових втрат (потужності внутрішніх джерел тепла) задаються у вузлах скінченоелементної сітки, яка повинна бути узгоджена для обох задач (моделювання електромагнітних та теплових процесів), що розв’язуються постійно

4) початкове значення температури T_0 (як правило, вказується, постійна по всьому перетину конструктивних елементів кімнатна температура 20°C , хоча в загальному випадку можливо задати довільний просторовий початковий розподіл температури)

5) величини коефіцієнт теплообміну з зовнішнім середовищем α та температури зовнішнього середовища (охолоджувача) T_{∞} для кожної з границь, що розглядаються. Величини α та T_{∞} суттєво залежать від виду та швидкості охолоджувача (наприклад, повітряне охолодження індуктора плити за допомогою вентилятора або водяне охолодження

конструктивних елементів), отже для їх коректного задавання потрібно скористатися відповідною довідковою літературою або навіть провести додаткові дослідження [4].

Структура результатів обчислень. Результатом комп'ютерного моделювання є розподіл у просторі та часі температурного поля конструктивних елементів індукційної кухонної плити, що розглядаються. Доцільно також здійснити автоматичну "зворотну" передачу отриманого розподілу температури $T(x,y,t)$ до програмного забезпечення, призначеного для скінченоелементного аналізу розподілу електромагнітного поля [5, 6], для розв'язання зв'язаних задач з урахуванням залежностей електрофізичних властивостей матеріалів від температури [5]. Відповідні алгоритми комп'ютерного моделювання зв'язаних (мультифізичних) електромагнітних та теплових явищ, що мають місце в процесі роботи індукційних кухонних плит, з урахуванням їх взаємного впливу одне на інше, будуть описані в наступних роботах.

Висновки. У роботі побудовано математичну модель та методику чисельного аналізу розподілу теплового поля основних конструктивних елементів індукційної кухонної плити у двовимірній постановці методом скінчених елементів. Враховуються залежності від температури теплофізичних властивостей конструкцій, що розглядаються. Наведено структуру вихідних даних та результатів обчислень. Отримані результати розрахунків будуть проаналізовані в наступних роботах.

Список літератури: 1. Пантелят М.Г., Гуренцов Ю.В., Трофімов А.В. Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 20 (1063). – С. 13-24. 2. Пантелят М.Г., Гуренцов Ю.В. Методика комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 41 (1084). – С. 16-24. 3. Holman J.P. Heat Transfer. – New York : McGraw-Hill, 2002. – 688 p. 4. Doležel I., Karban P., Mach F. Induction heating of rotating nonmagnetic billet in magnetic field produced by high-parameter permanent magnets // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 2. – С. 32-36. 5. Pantelyat M.G., Féliachi M. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals // The European Physical Journal Applied Physics. – 2002. – v. 17. – P. 29-33. 6. Tutorial EleFAnT2D. <<http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>>.

Bibliography (transliterated): 1. Pantelyat M.G., Gurentsov Ju.V., Trofimov A.V. "A technique for inductor cookers' inductors calculation". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice.* 20 (1063) (2014): 13-24. Print. 2. Pantelyat M.G., Gurentsov Ju.V. "A FE technique for induction cooker electromagnetic field distribution computer simulation". *Bulletin of NTU "KhPI".*

Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice. 41 (1084) (2014): 16-24. Print. **3.** Holman J.P. *Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill, 2002. Print. **4.** Doležel I., Karban P., Mach F. "Induction heating of rotating nonmagnetic billet in magnetic field produced by high-parameter permanent magnets". *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2 (2014): 32-36. Print. **5.** Pantelyat M.G., Féliachi M. "Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals". *The European Physical Journal Applied Physics*. 17 (2002): 29-33. Print. **6.** Tutorial EleFAnT2D. Web. <<http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>>.

Надійшла (received) 25.11.2014



Пантелейят Михайло Гаррійович, старший викладач кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "ХПІ". В 1985 р. закінчив Харківський політехнічний інститут за спеціальністю "Інженерна електрофізика". Кандидат фізико-математичних наук (1991 р., спеціальність "Механіка деформівного твердого тіла"). Основні наукові інтереси: комп'ютерне моделювання електромагнітних, теплових і механічних процесів в електромагнітних пристроях різного призначення.



Трофімов Андрій Володимирович, студент електромашинобудівного факультету Національного технічного університету "ХПІ", група ЕМБ-20АМ. Область інтересів – дослідження, розрахунок і проектування сучасної електропобутової техніки.

В.Ф. БОЛЮХ, д.т.н., проф., НТУ "ХПИ"

С.В. ОЛЕКСЕНКО, аспирант, НТУ "ХПИ"

**ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА РАДИАЛЬНЫХ РАЗРЕЗОВ
ФЕРРОМАГНИТНОГО ЭКРАНА НА ПОКАЗАТЕЛИ
ЛИНЕЙНОГО ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Предложена концепция линейного индукционно-динамического преобразователя (ЛИДП), у которого ферромагнитный экран (ФЭ) выполнен с радиальными разрезами. Установлено, что при увеличении количества разрезов уменьшаются индуцированные токи в ФЭ и увеличивается электродинамическая сила, действующая на якорь ЛИДП. Оптимальным является ФЭ с четырьмя радиальными разрезами. КПД ЛИДП с таким ФЭ повышается на 45 % по сравнению с КПД преобразователя с массивным ФЭ. В результате экспериментальных исследований установлено, что наличие четырех радиальных разрезов в ФЭ увеличивает скорость якоря на 47 %.

Ключевые слова: линейный индукционно-динамический преобразователь, ферромагнитный экран, радиальные разрезы, экспериментальные исследования.

Вступление. Линейные индукционно-динамические преобразователи (ЛИДП) широко используются в промышленных, оборонных и научно-технических системах, где необходимы значительные ударные механические нагрузки при относительно незначительных перемещениях исполнительного ударного элемента и ограниченных габаритах [1-3].

ЛИДП применяются в электромагнитных молотах и перфораторах [4, 5], в сейсмоисточниках [6], в испытательных комплексах для проверки ответственных изделий на ударные нагрузки [7], в системах очистки вагонов, трюмов, фильтров и иных емкостей от остатков продуктов и налипших материалов [8], в системах защиты информации на цифровых накопителях [9] и т.п.

Возбуждаемый от емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) индуктор ЛИДП индуцирует в массивном электропроводящем якоре ток, который обуславливает возникновение электродинамических усилий, между индуктором и якорем, передаваемых от последнего на ударную пластину, взаимодействующую с исполнительным элементом.

Существует целый ряд подходов, направленных на повышение эффективности ЛИДП. Одним из направлений совершенствования

© В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко, 2015

ЛИДП является применение специальных экранов. Как известно, электромагнитный экран уменьшает поля рассеяния, но ухудшает электромеханические показатели ЛИДП [10]. Рассмотрим применение ферромагнитного экрана (ФЭ), который способен уменьшить магнитное поле рассеивания при одновременном повышении силовых показателей и КПД ЛИДП [11, 12]. Такой экран должен быть выполнен в виде диска с наружной цилиндрической обечайкой, охватывая индуктор ЛИДП с торцевой и наружной боковой стороны. Однако указанные эффекты возможны при условии, что ФЭ выполнен из материала, в котором электропроводность мала, вследствие чего в нем не будут индуцироваться вихревые токи. Дело в том, что вихревые токи препятствуют проникновению магнитного поля в массив ФЭ и ухудшают электромеханические показатели ЛИДП.

Для радикального уменьшения электропроводности ФЭ может быть изготовлен из магнитодиэлектрика. Однако изготовление ФЭ из такого материала сопряжено с рядом технических трудностей. Данная проблема может быть решена путем изготовления ФЭ из массивного стального элемента, в котором выполнены радиальные разрезы, препятствующие протеканию указанных токов. Если таких разрезов больше одного, то они должны быть расположены равномерно в тангенциальном направлении. При этом возникает вопрос о количестве таких разрезов, поскольку это сказывается на технологичности такого ФЭ.

Целью статьи является исследование влияния радиальных разрезов ферромагнитного экрана на электромеханические показатели ЛИДП.

Математическая модель ЛИДП. Для исследования рабочих процессов ЛИДП используется компьютерная 2D модель в программном пакете *COMSOL Multiphysics* 4.4 [13, 14]. Электромагнитные процессы ЛИДП описываются дифференциальным уравнением в цилиндрической системе координат (r, z) при помощи векторного магнитного потенциала $\bar{A} = (\bar{A}_r, \bar{A}_z)$:

$$\sigma \cdot \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \bar{H} - \sigma \cdot \bar{V} \times \bar{B} = \bar{J}_e, \quad (1)$$

где σ – электропроводность, адаптивно учитывающая температуру индуктора, якоря или ФЭ; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; \bar{V} – скорость перемещения якоря; \bar{J}_e – плотность тока в узле расчетной

сетки; \bar{B} – индукция магнитного поля $\bar{B} = \nabla \times \bar{A}$; \bar{H} – напряженность магнитного поля.

Ток в индукторе i_1 описывается уравнением:

$$\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \bar{B}) - \sigma \bar{V} \times \bar{B} = \frac{i_1 N_1}{S_1}, \quad (2)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; N_1 – число витков индуктора; S_1 – площадь сечения витка индуктора.

Значение аксиальной составляющей силы, действующей на якорь ЛИДП, определяется посредством тензора натяжения Максвелла T :

$$f_z = 2\pi r \int_{\partial\Omega} \bar{n} \cdot T dS, \quad (3)$$

где \bar{n} – вектор внешней нормали к поверхности интегрирования dS .

Система уравнений (1)-(3) содержит начальные условия:

$$\bar{A}_{t=0}(\bar{A}_r, \bar{A}_z) = \bar{A}(0,0), \quad (4)$$

и граничные условия на границе расчетной области:

$$\bar{n} \times \bar{A} = 0. \quad (5)$$

Механические процессы ЛИДП при учете окружающей среды, сил трения и воздействия буферного (возвратного) элемента можно описать уравнением [15]:

$$f_z(t, z) = (m_2 + m_e) \frac{dV}{dt} + K_p \Delta Z(t) + K_T V(t) + 0,125\pi \gamma_a \beta_a D_{ex2}^2 V^2(t), \quad (6)$$

где m_2 , m_e – масса якоря и ИЭ соответственно; K_p – коэффициент упругости буферного элемента; $\Delta Z(t)$ – перемещение якоря с ИЭ; K_T – коэффициент динамического трения; γ_a – плотность среды перемещения; β_a – коэффициент аэродинамического сопротивления среды, в которой происходит перемещение якоря с ИЭ; D_{ex2} – максимальный диаметр якоря; $f_z(t, z)$ – электродинамические или электромагнитные силы, действующие на якорь со стороны индуктора.

Для определения температур активных элементов (индуктор и якорь) и пассивных элементов (ФЭ, ударная пластина) ЛИДП используются уравнения [15]:

$$c_n(T) \cdot \gamma_n \frac{\partial T_n}{\partial t} = \lambda_n(T) \left(\frac{\partial^2 T_n}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_n}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_n}{\partial z^2} \right) + j_n^2(t) \cdot K_v \cdot \rho_n(T), \quad (7)$$

$$c_m(T) \cdot \gamma_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m(T) \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

где $n = 1, 2$ – индексы, относящиеся к индуктору и якорю соответственно; $m = 3, 4$ – индексы, относящиеся к ФЭ и ударной пластине соответственно; $c(T)$ – усредненная удельная теплоемкость; γ – усредненная плотность материала; $j(t)$ – плотность тока активного элемента; $\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности; K_v – коэффициент заполнения активного элемента; $\rho(T)$ – удельное сопротивление активного элемента.

Система уравнений (7), (8) дополняется граничными условиями на поверхности ξ . На охлаждаемой поверхности используются граничные условия третьего рода, описывающие процесс теплоотдачи:

$$-\frac{\partial T_\xi}{\partial n} = \frac{\alpha}{\lambda} (T_\xi - T_0), \quad (9)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; n – нормаль к поверхности; T_0 – температура окружающей среды.

На границе контакта активных и пассивных элементов используются граничные условия четвертого рода:

$$T_n(r_\xi, z_\xi, t) = T_m(r_\xi, z_\xi, t); \lambda_n \frac{\partial T_{n\xi}}{\partial n} = \lambda_m \frac{\partial T_{m\xi}}{\partial n}. \quad (10)$$

На оси симметрии ЛИДП используются граничное условие второго рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_\xi = 0. \quad (11)$$

Коэффициент теплопроводности индуктора вдоль соответствующих осей определяется по формуле

$$\lambda_w = \frac{\lambda_p \lambda_i \lambda_k (h_p + 2h_i + h_k)}{h_p \lambda_i \lambda_k + 2h_i \lambda_p \lambda_k + h_k \lambda_p \lambda_k}, \quad (12)$$

где $\lambda_p, \lambda_i, \lambda_k$ – коэффициенты теплопроводности проводника, изоляции и эпоксидного компаунда, соответственно; h_p, h_i, h_k – толщина проводника, изоляции и компаунда в выбранном направлении соответственно.

Решения системы уравнений (1)-(12) производится методом BDF (*backward differentiation formula*) с фиксированным шагом по времени, неравномерной сеткой и использованием решателя PARDISO.

КПД ЛИДП будем оценивать соотношением [3]

$$\eta = (m_2 + m_e) V^2 C^{-1} U_0^{-2}. \quad (13)$$

Конструктивная схема ЛИДП. Рассмотрим ЛИДП коаксиальной конфигурации, у которого ФЭ выполнен в виде диска с наружной обечайкой, со следующими параметрами активных элементов [14].

Индуктор: Наружный диаметр $D_{ex1}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in1}=10$ мм, высота $H_1=10$ мм, число витков $N_1=46$ шт., сечение витка $S_1=8,64 \text{ mm}^2$.

Якорь: наружный диаметр $D_{ex2}=100$ мм, внутренний диаметр $D_{in2}=10$ мм, высота $H_2=3$ мм. Якорь выполнен в виде сплошного медного диска.

ФЭ: наружный диаметр обечайки $D_{ex3}=118$ мм, высота дискового основания $H_{3a}=8$ мм, высота наружной обечайки $H_{3b}=24$ мм.

Индуктор возбуждается от ЕНЭ, имеющего емкость $C=2850 \text{ мкФ}$ и напряжение $U_0=400$ В. Электронная схема обеспечивает апериодический импульс тока индуктора (индуктор шунтирован обратным диодом). Масса ИЭ $m_e=0,245$ кг.

Электромеханические и электромагнитные показатели ЛИДП. Электромеханические характеристики ЛИДП, у которого ФЭ изготовлен из магнитодиэлектрика, представлены в работе [13]. Для этого ЛИДП на рис. 1 показано распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока индуктора. ЛИДП содержит индуктор 1, якорь 2 и ФЭ 3 (эти обозначения будут использоваться в последующем). Наибольшие значения индукции магнитного поля наблюдаются во внутреннем отверстии индуктора и в области между индуктором и якорем. При этом во всем массиве магнитодиэлектрического ФЭ проходит магнитное поле, а наиболее нагруженной является серединная область дисковой основания.

При выполнении ФЭ из стали с радиальными разрезами происходит изменение как электромеханических характеристик ЛИДП, так и распределения магнитных полей. На рис. 2 представлены электромеханические характеристики ЛИДП, у которого ФЭ выполнен с четырьмя радиальными разрезами. Здесь показаны плотности тока в индукторе j_1 , электропроводящем якоре j_2 и ФЭ j_3 . В якоре и ФЭ токи представлены с измененной полярностью по отношению к току индуктора, а их плотности являются усредненными по сечению этих элементов.

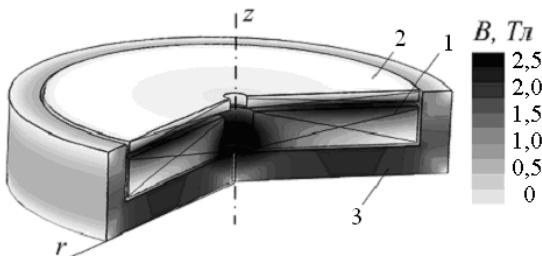


Рис. 1 – Распределение индукции магнитного поля в момент максимума тока индуктора: 1 – индуктор; 2 – якорь; 3 – ФЭ, изготовленный из магнитодиэлектрика

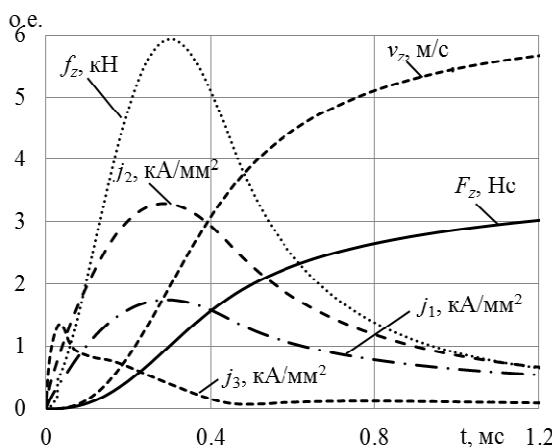


Рис. 2 – Электромеханические характеристики ЛИДП, у которого ФЭ выполнен с четырьмя радиальными разрезами

Токи в индукторе и якоре имеют характер апериодического импульса с максимальными значениями в момент времени $t = 0,3$ мс. Характер тока в ФЭ существенно отличается. Максимум тока возникает значительно раньше в момент времени $t = 0,05$ мс. После чего до момента времени $t = 0,1$ мс ток быстро затухает, но в последующем скорость затухания уменьшается. Этот ток практически полностью затухает до момента времени 0,5 мс, в то время как токи в индукторе и якоре при этом значительны.

На рис. 3 показано распределение индуцированной плотности тока в дисковом основании ФЭ, выполненном с четырьмя радиальными разрезами, в момент времени $t = 0,3$ мс. Наибольшие

значения индуцированного тока наблюдаются в центральной области каждого из четырех сегментов дисковой части ФЭ. Наименьшая плотность тока наблюдается в области вблизи оси ЛИДП. Представленная шкала интенсивности индуцированного тока будет использоваться в последующем.

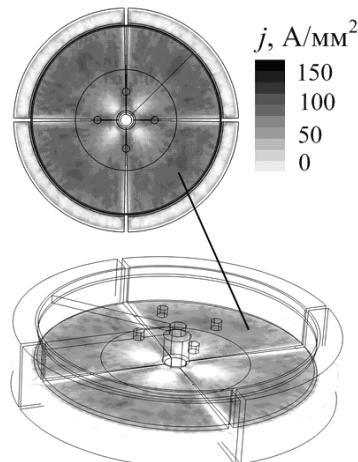


Рис. 3 – Распределение плотности тока в ФЕ с четырьмя радиальными разрезами при максимуме тока индуктора

В зависимости от количества N радиальных разрезов меняется характер и величина плотности тока, индуцированного в ФЭ (рис. 4). Чем больше радиальных разрезов в ФЭ, тем ниже амплитуда плотности тока. Но длительность этих токов практически неизменна. Первый импульс тока почти полностью затухает к моменту времени $t = 0,45$ мс, после чего следует повторный импульс с многократно меньшей величиной.

На рис. 5 представлено распределение индуцированных токов в момент максимума тока индуктора в ЛИДП, у которого ФЭ имеет различное количество N радиальных разрезов. Как следует из представленных распределений, максимальные токи индуцируются в массивном ФЭ без радиальных разрезов. Но при этом ток индуцируется лишь в поверхностном слое, не проникая в стальной массив ФЭ. Наибольшие токи индуцируются в дисковом основании ФЭ, а в наружной обечайке токи меньше и проникают на меньшую глубину в стальной массив.

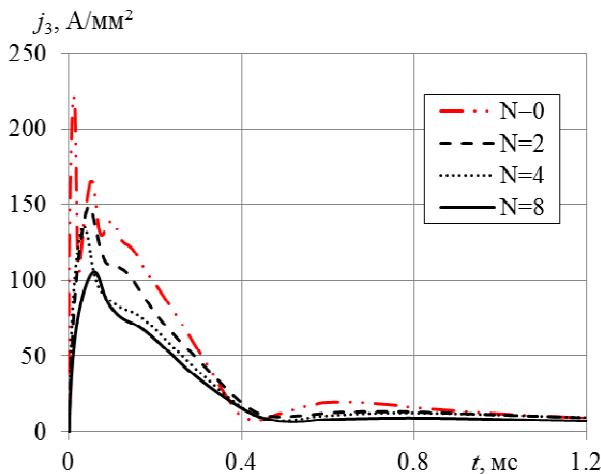


Рис. 4 – Усредненные плотности токов в ФЭ, выполненном с N радиальными разрезами

При увеличении числа радиальных разрезов величина индуцированных токов в ФЭ снижается и ток все больше проникает в стальной массив. Наличие радиальных разрезов несколько уменьшает активную поверхность ФЭ, что негативно для экранирования магнитных полей и усиления поля в зоне якоря. Но при этом уменьшаются индуцированные вихревые токи в ФЭ, которые оказывают размагничивающее действие в указанной активной зоне.

Влияние количества N радиальных разрезов ФЭ на величину и характер электродинамической силы f_z , действующей на якорь ЛИДП, показано на рис. 6 (вариант $N = \infty$ соответствует ФЭ, изготовленному из магнитодиэлектрика). При отсутствии разрезов ($N=0$) амплитуда электродинамической силы наименьшая. С увеличением количества радиальных разрезов амплитуда и длительность силы f_z возрастают. Однако при этом можно отметить следующую тенденцию. С увеличением количества N разрезов ФЭ увеличение амплитуды электродинамической силы f_{zm} , замедляется. По сравнению с массивным ФЭ ($N=0$) при 2-х разрезах ФЭ сила f_{zm} возрастает на 12,7 %, при 4-х разрезах – на 17,1 %, при 8-и разрезах – на 19,2 %. При отсутствии разрезов и изготовлении ФЭ из магнитодиэлектрика сила f_{zm} возрастает на 35,9 %.

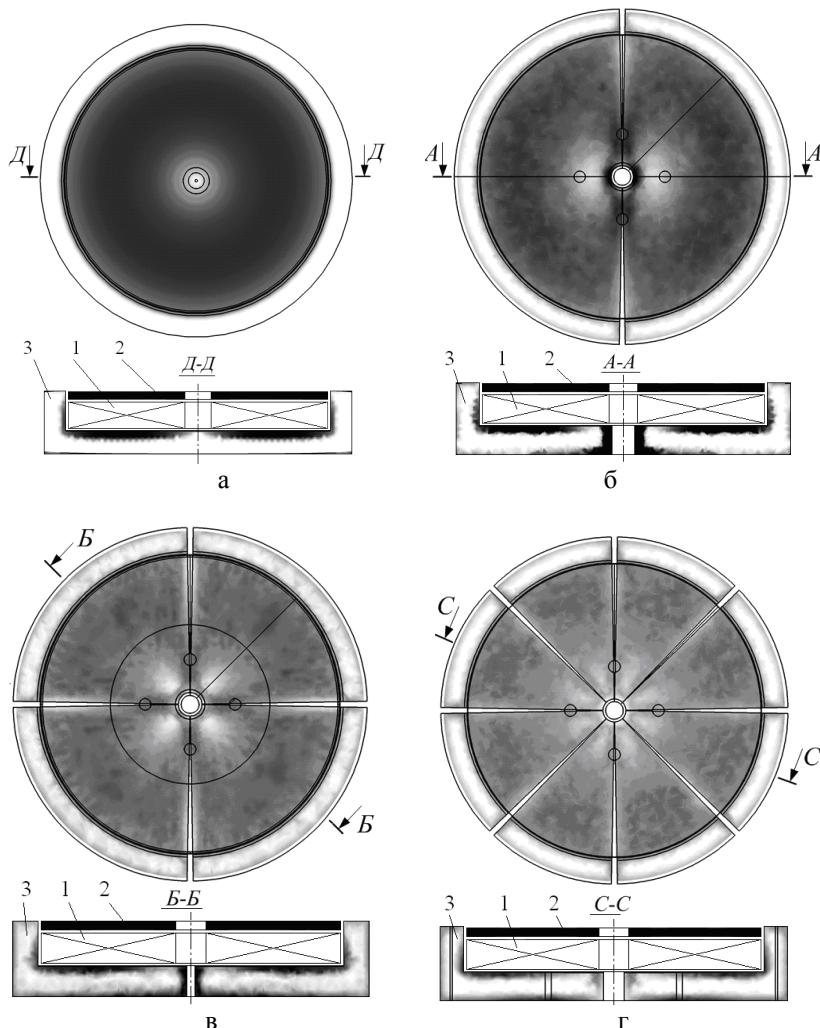


Рис. 5 – Распределение индуцированных токов в ЛИДП, у которого ФЭ имеет радиальных разрезов N : а – 0, б – 2, в – 4, г – 8

На рис. 7 показаны относительные значения КПД ЛИДП, у которых ФЭ имеет N радиальных разрезов (вариант $N = \infty$ соответствует ФЭ, изготовленному из магнитодиэлектрика).

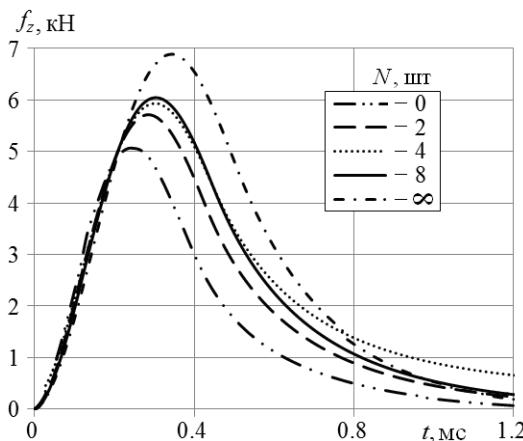


Рис. 6 – Электродинамические усилия, действующие на якорь ЛИДП в зависимости от количества N радиальных разрезов ФЭ

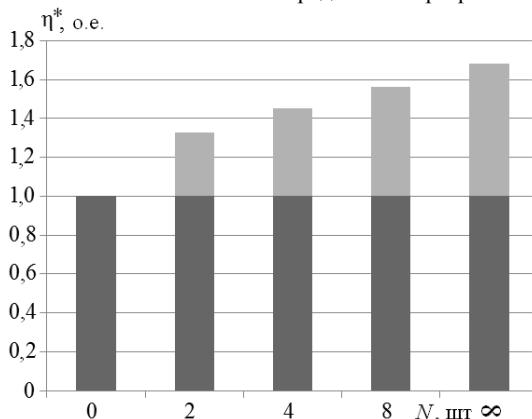


Рис. 7 – Сравнительная диаграмма КПД ЛИДП в зависимости от количества N радиальных разрезов ФЭ

В качестве базового варианта принят ЛИДП, у которого ФЭ выполнен массивным без разрезов. Анализируя представленные зависимости можно сделать вывод, что оптимальным с точки зрения технологичности и конструктивной сложности при учете КПД является ФЭ с числом разрезов $N = 4$. В сравнении с базовым вариантом КПД такого ЛИДП повышается на 45 %.

Экспериментальные исследования ЛИДП. Для проверки теоретических результатов была использована экспериментальная установка, представленная на рис. 8 [16].

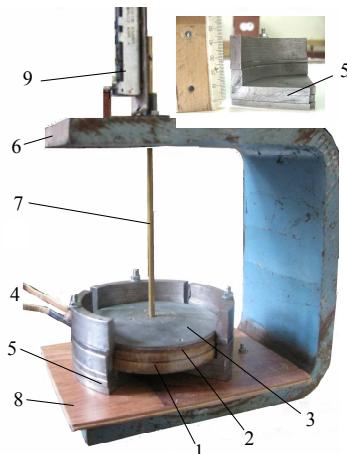


Рис. 8 – Общий вид экспериментальной установки для исследования ЛИДП

Установка включает индуктор 1 ЛИДП, который состоит из многовитковой обмотки, намотанной из медной шины в два слоя и выполненной монолитной путем пропитки эпоксидной смолой. Дисковый якорь 2 выполнен из технической меди. К якорю прикрепляется ударный диск 3.

Индуктор посредством токовводов 4 соединяется с ЕНЭ. Индуктор коаксиально устанавливается в составной ФЭ 5, выполненный с четырьмя радиальными разрезами (рис. 9).

Экспериментальная установка содержит каркас 6, выполненный из стальной плиты С-образной формы. Между верхней и нижней стенками каркаса 6 подвижно установлен направляющий латунный стержень 7, проходящий через центральные отверстия индуктора и якоря. Индуктор установлен на неметаллическом основании 8 на нижней стенке каркаса, а на верхней стенке каркаса установлен резистивный датчик перемещений 9. К верхней стенке каркаса крепится демпфирующая пружина. Направляющий стержень соединен с ударным диском и подвижным контактом датчика перемещений.



Рис. 9 – Вид ЛИДП, у которого ФЭ выполнен с четырьмя радиальными размерами

На рис. 10 представлена электрическая схема экспериментальной установки.

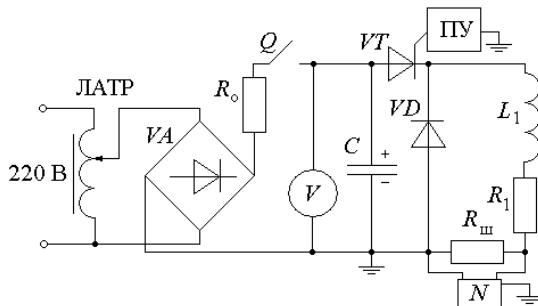


Рис. 10 – Электрическая схема экспериментальной установки для исследования ЛИДП

Питание экспериментальной установки осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и регулируется автотрансформатором ЛАТР. После трансформатора напряжение поступает на выпрямитель VA, после чего осуществляется заряд ЕНЭ C – батареи электролитических конденсаторов. При достижении необходимого зарядного напряжения U_0 ЕНЭ отключается от сети ключом Q . При подаче сигнала с пускового устройства ПУ тиристор VT открывается, ЕНЭ разряжается на индуктор с активным сопротивлением R_1 и индуктивностью L_1 . При этом генерируется импульсное магнитное поле, которое в начале переходного процесса индуцирует ток противоположного направления в якоре. Между якорем и индуктором возникают электродинамические усилия, обеспечивающие перемещение якоря с ударным диском и направляющим стержнем в вертикальном направлении. При помощи

электронного осциллографа N снимаются показания резистивного датчика перемещений, а при помощи измерительного шунта $R_{\text{ш}}$ типа 75ШСММ3-200-0,5 на осциллографе измеряется токовый импульс в индукторе.

Для формирования апериодического полярного импульса тока индуктор шунтируван обратным диодом VD .

Каждая из четырех разрезанных частей ФЭ состоит из наружной обечайки, формируемой тремя элементами, которые обозначены буквами **а**, **б**, **в** (рис. 11). Дисковое основание каждой разрезанной части ФЭ формируется тремя одинаковыми элементами **г**. Все элементы фиксируются между собой при помощи крепежных элементов **д**.

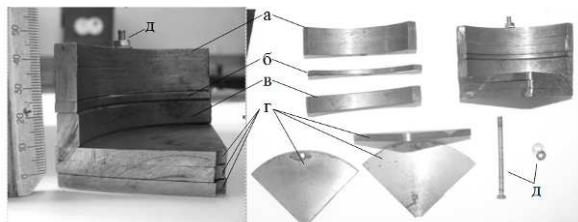


Рис. 11 – Элементы четверти составного ФЭ

При помощи электронного осциллографа одновременно измерялся ток в индукторе i_1 и перемещение якоря с ударным диском ΔZ (рис. 12).

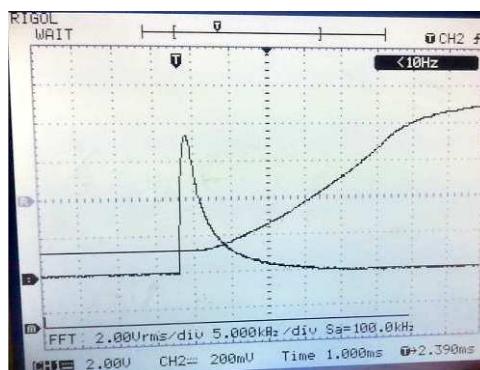


Рис. 12 – Осциллограмма импульса тока индуктора и показаний датчика перемещений якоря

В результате экспериментальных исследований было установлено, что ФЭ с четырьмя радиальными разрезами увеличивает скорость якоря V на 47 % по сравнению с вариантом массивного неразрезанного ФЭ.

Получено удовлетворительное согласование между измеренными и расчетными электромагнитными (до 10 %) и механическими (до 5 %) показателями ЛИДП, что свидетельствует о достоверности расчетной модели.

Выводы. Предложена концепция ЛИДП, у которого ФЭ выполнен с радиальными разрезами, упорядочено расположеными в тангенциальном направлении.

Установлено, что при увеличении количества разрезов уменьшаются индуцированные токи в ФЭ и увеличивается электродинамическая сила, действующая на якорь ЛИДП.

Оптимальным с точки зрения технологичности, конструктивной сложности и эффективности является ФЭ с четырьмя радиальными разрезами. КПД ЛИДП с таким ФЭ повышается на 45 % по сравнению с КПД преобразователя с массивным ФЭ без разрезов.

В результате экспериментальных исследований установлено, что наличие четырех радиальных разрезов в ФЭ увеличивает скорость якоря на 47 %.

Получено удовлетворительное согласование между измеренными и расчетными электромагнитными (до 10 %) и механическими (до 5 %) показателями ЛИДП.

Список литературы: 1. Болюх В.Ф., Коритченко К.В. Основні напрямки розвитку електромеханічних імпульсних прискорювачів // Електротехніка і електромеханіка. – 2009. – № 4. – С. 7-13. 2. Здор Г.Н., Мамутов А.В., Мамутов В.С., Смотраков Д.В. Розробка ефективних технологіческих устройств для магнітно-еластоімпульсной виробки-пробивки тонколистових матеріалів // Металлообробка. – 2001. – № 2. – С. 28-32. 3. Болюх В.Ф., Шукін І.С. Лінейные индукционно-динамические преобразователи. – Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing - 2014. – 496 с. (<https://www.lap-publishing.com>). 4. Узаров Г.Г., Нейман В.Ю. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 37-43. 5. Нейман В.Ю. Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулированием магнитной энергии в динамических режимах // Електротехника. – 2003. – № 2. – С. 30-36. 6. Гурин А.Г., Набока Б.Г., Гладченко В.Я. Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов // Технічна електротехніка. – 2001. – № 2. – С. 3-6. 7. Татмышлєвский К.В., Козлов С.А. Магнитно-импульсные установки для испытаний изделий авиакосмической техники на ударные воздействия // Авиакосмическое приборостроение. – 2005. – № 12. – С. 52-57. 8. Тюткін В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Електротехника. – 2002. – № 11. – С. 24-28. 9. Болюх В.Ф., Марков А.М.,

Луцук В.Ф., Щукин И.С. Устройство защиты компьютерной информации от несанкционированного доступа на основе индукционно-динамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 2. – С. 5-10. **10.** Bolyukh V.F., Rassokha M.A. Influence of external electromagnetic screen on efficiency of impact electromechanical converter of disk configuration // Russian electrical engineering. – 2010. – Vol. 81. – № 10. – P. 542-549. **11.** Болох В.Ф. Пути совершенствования линейных электромеханических преобразователей импульсного действия // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 5. – С. 14-21. **12.** Болох В.Ф., Щукин И.С. Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 5. – С. 5-11. **13.** Болох В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Влияние параметров ферромагнитного сердечника на эффективность индукционно-динамического двигателя // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №6. – С.20-27. **14.** Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter // Refrigeration Science and Technology. – 13th International Institute of Refrigeration Conference on Cryogenics. – Prague, Czech Republic. – April 7-11, 2014. – Code 106226. – 2014. – P. 268-275. **15.** Bolyukh V.F., Shchukin I.S. The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode // Russian electrical engineering. – 2012. – Vol. 83, № 10. – P. 571-576. **16.** Болох В.Ф., Олексенко С.В., Щукин И.С. Экспериментальные исследования влияния параметров ферромагнитного сердечника на электромеханические показатели линейного индукционно-динамического преобразователя // Електротехніка і електромеханіка. – 2014. – № 5. – С.13-18.

Bibliography (transliterated): **1.** Bolyukh V.F., Korytchenko K.V. "The main directions of electromechanical pulse accelerator". *Electrical engineering & electromechanics*. 4 (2009): 7-13. Print. **2.** Zdor G.N., Mamut A.V., Mamut V.S., Smotrov D.V. "Development of effective technological devices for magnetic elastoimpulsnoy cutting-punching thin materials". *Metal Processing*. 2 (2001): 28-32. Print. **3.** Bolyukh V.F., Shchukin I.S. *Linear induction-dynamic converters*. Saarbrucken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. Web. <<https://www.lap-publishing.com>>. **4.** Ugarov G.G., Neiman V.Y. "Trends in the development and use of hand-held drum machines with electromechanical energy conversion". *Proceedings of the universities. Electromechanics*. 2 (2002): 37-43. Print. **5.** Neiman V.Y. "Analysis of the processes of energy conversion of linear electromagnetic machines with preliminary accumulation of magnetic energy in dynamic modes". *Electrical Engineering*. 2 (2003). 30-36. Print. **6.** Gurin A.G., Naboka B.G., Gladchenko V.J. "Wave phenomena in electromagnetic emitters and the formation of complex acoustic signals". *Tehnichna Elektrodinamika*. 2 (2001): 3-6. Print. **7.** Tatmyshovsky K.V., Kozlov S.A. "Magnetic pulse installation for testing products for aerospace shock effects". *Aerospace Instrument*. 12 (2005): 52-57. Print. **8.** Tyutkin V.A. "Magnetic pulse method for breaking arches and cleaning of process equipment from adhering materials". *Electrical Engineering*. 11 (2002): 24-28. Print. **9.** Bolyukh V.F., Markov A.M., Luchuk V. F., Shchukin I.S. "Device protecting computer information against unauthorized access on the basis of induction-dynamic motor". *Electrical engineering & electromechanics*. 2 (2008): 5-10. Print. **10.** Bolyukh V. F., Rassokha M. A. "Influence of external electromagnetic screen on efficiency of impact electromechanical converter of disk configuration". *Russian electrical engineering*. Vol. 81. No. 10 (2010): 542-549. Print. **11.** Bolyukh V.F. "Ways of improving the linear electromechanical converters impulse action". *Electrical engineering & electromechanics*. 5 (2006): 14-21. Print. **12.** Bolyukh V.F., Shchukin I.S. "Circuit-design improvement shock induction type electromechanical converters". *Electrical engineering & electromechanics*. 5 (2010): 5-11. Print. **13.** Bolyukh V.F., Oleksenko

S.V., Shchukin I.S. "Influence of parameters on the efficiency of the ferromagnetic core of the induction-dynamic motor". *Electrical engineering & electromechanics*. 6 (2012): 20-27. Print.

14. Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Katkov I.I. "The use of fast cryogenic cooling and ferromagnetic core greatly increases efficiency of a linear induction-dynamic converter". *Refrigeration Science and Technology. 13th International Institute of Refrigeration Conference on Cryogenics*. Prague, Czech Republic. April 7-11, 2014. Code 106226. 2014. 268-275. Print.

15. Bolyukh V.F., Shchukin I.S. "The thermal state of an electromechanical induction converter with impact action in the cyclic operation mode". *Russian electrical engineering*. Vol. 83, № 10 (2012): 571-576. Print. **16.** Bolyukh V.F., Oleksenko S.V., Shchukin I.S. "Experimental studies of the influence of parameters on the ferromagnetic core parameters electromechanical linear induction-dynamic converter". *Electrical engineering & electromechanics*. 5 (2014): 13-18. Print.

Поступила (received) 15.02.2015



Бolioх Владимир Федорович, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера по специальности "Криогенная техника" в 1979 г., диссертации кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1987 и 2003 гг. Профессор кафедры "Общая электротехника" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" "с 2004 г. Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия, криогенных и сверхпроводящих электромеханических устройств.



Олекsenко Сергей Владимирович. Защитил диплом магистра в Национальном техническом университете "Харьковский политехнический институт" в 2011 г. Аспирант кафедры общей электротехники НТУ "ХПИ". Научные интересы связаны с проблемами линейных электромеханических преобразователей импульсного действия.

УДК 621.316.91

В.С. МАРКОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"
И.В. ПОЛЯКОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"
С.М. КОЖЕМЯКИН, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ"

ПРОБЛЕМАТИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ И ИХ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В статье рассмотрены проблемы использования асинхронных генераторов на ветроэлектростанциях. В частности – возбуждение этих генераторов, выбор емкостей возбуждения и корректирующих емкостей, стабилизация напряжения генератора под нагрузкой, переходные процессы в асинхронном генераторе на ветроэлектростанции. Рассматриваются модели асинхронного генератора на ветроэлектростанции для компьютерного моделирования.

Ключевые слова: асинхронный генератор, ветроэлектростанция, проблемы асинхронных генераторов, компьютерное моделирование асинхронного генератора на ветроэлектростанции.

Актуальность. В настоящее время, в условиях постоянно сокращающихся невозобновляемых источников энергии, во всем мире усиливается тенденция к использованию возобновляемых источников энергии, прежде всего это касается энергии ветра. Так, например, в странах ЕС в 2010 году с помощью ветроэлектростанций (ВЭС) получено около 170 гигаватт электроэнергии. Актуальность этого направления развития энергетики подчеркивается тем, что за последние 15 лет количество электроэнергии, выработанной ВЭС, возросло почти в тридцать раз. Особенно преуспели в ветроэнергетике Дания и Германия.

В ВЭС могут использоваться как генераторы постоянного тока, так и переменного, причем как синхронные, так и асинхронные. Выработка энергии постоянного тока осуществляется практически только на малых мощностях не более 10 кВт, так как генераторы постоянного тока относительно дороги и не очень надежны в эксплуатации. Энергия переменного тока в основном вырабатывается синхронным генератором (СГ), однако использование асинхронного генератора (АГ), на наш взгляд, является достаточно перспективным.

Анализ исследований и публикаций. Во-первых, как указано в [1, 2] АГ отличаются простотой эксплуатации и обслуживания, легко включаются на параллельную работу, во-вторых, форма кривой

© В.С. Марков, И.В. Поляков, С.М. Кожемякин

выходного напряжения у них ближе к синусоидальной, чем у синхронных генераторов при работе на одну и ту же нагрузку. В третьих, масса АГ мощностью 5-100 кВт примерно в 1,3-1,5 раза меньше массы СГ такой же мощности. Причем, в качестве АГ, можно применять обычные асинхронные двигатели. В отличие от СГ асинхронные генераторы не подвержены опасности выпадения из синхронизма. Кроме того, в [1] указывается, что главное преимущество АГ состоит в том, что напряжение на его выходе имеет постоянную частоту при изменении частоты вращения ротора в некоторых пределах и ему свойственна большая устойчивость при работе на сеть, чем у СГ. Последнее обстоятельство крайне важно в связи с тем, что ВЭС становятся все более мощными.

Однако АГ не получили широкого распространения, что объясняется рядом их недостатков по сравнению с СГ. Ввиду того, что в генераторном режиме асинхронной машины условия создания вращающегося поля статора такие же, что и в двигательном режиме (и в том, и в другом режимах обмотка статора включена в сеть с напряжением U_1 , и потребляет из сети намагничивающий ток I_0), то асинхронная машина в генераторном режиме обладает особыми свойствами: она потребляет реактивную энергию из сети, необходимую для создания вращающегося поля статора, но отдает в сеть активную энергию, получаемую в результате преобразования механической энергии первичного двигателя. Одним из существенных недостатков АГ является значительная реактивная мощность, потребляемая ими из сети. Величина этой мощности пропорциональна намагничивающему току I_0 и может достигать 25-45 % от номинальной мощности машины. Из этого следует, что для работы 3-4 асинхронных генераторов необходимо использовать один синхронный генератор такой же мощности, что и мощность одного асинхронного генератора.

Если же АГ работают параллельно на общую сеть с несколькими СГ, то большая величина реактивной мощности возбуждения АГ значительно понизит коэффициент мощности всей электрической сети.

АГ может работать и в автономных условиях, т.е. без включения в общую сеть. Но в этом случае для получения реактивной мощности, необходимой для намагничивания генератора, используется батарея конденсаторов, которая подключается к выводам АГ параллельно нагрузке, как показано на рис. 1.

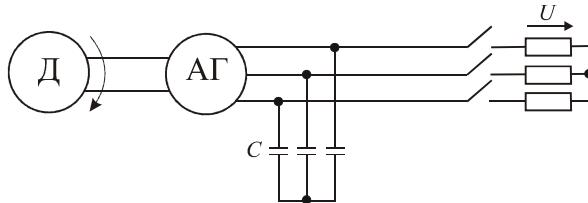


Рис. 1 – Включение конденсаторной батареи в фазы обмотки статора

Как указывается в [1, 3] непременным условием такой работы АГ является наличие остаточного намагничивания стали ротора, что необходимо для процесса самовозбуждения генератора. Небольшая ЭДС $E_{ост}$, наведенная в обмотке статора, создает в цепи конденсаторов, а следовательно, и в обмотке статора небольшой реактивный ток, усиливающий остаточный поток $\Phi_{ост}$ в ферромагнитной части магнитной цепи, который при вращении ротора АГ наводит в обмотке статора ЭДС остаточного поля. Эта ЭДС при шихтованном роторе составляет $E_{ост} = 2 \div 3 \%$ от номинального значения. В дальнейшем процесс самовозбуждения развивается, как и в генераторе постоянного тока параллельного возбуждения. Изменением емкости конденсаторов можно изменять величину намагничивающего тока, а следовательно, и величину напряжения генераторов. Из-за чрезмерной громоздкости и высокой стоимости конденсаторных батарей АГ с самовозбуждением не получили достаточного распространения. Асинхронные генераторы применяются лишь на ВЭС вспомогательного значения малой мощности.

Кроме того, в [4] указывается, что с присоединением к зажимам возбужденного АГ нагрузки потребляемая им реактивная мощность изменяется. Это фактор, а также необходимость компенсации реактивной мощности нагрузки заставляют увеличивать возбуждающую емкость до значения

$$C = \frac{P_1(\operatorname{tg}\phi_1 + \operatorname{tg}\phi_2) \cdot 10^9}{6\pi U_1^2}, \quad (1)$$

где P_1 – реактивная мощность, отдаваемая генератором, U_1 – линейное напряжение, f – частота напряжения, ϕ_1 , ϕ_2 – углы сдвига между напряжением и токами соответственно генератора и нагрузки.

Можно использовать корректирующие конденсаторы, которые соединяются между собой треугольником или звездой и включаются в каждую фазу нагрузки. Их емкость можно оценивать с учетом приведенной формулы и исходной емкости возбуждения, которая

рассчитывается из равенства реактивных мощностей конденсаторной батареи и АГ. Корректирующий конденсатор позволяет улучшить качество выходного напряжения, снизить броски токов статора и ротора, увеличить плавность в переходных процессах частоты напряжения и частоты вращения ротора, снизить колебания активной и реактивной мощности при включении нагрузки.

Согласно [1] альтернативой конденсаторному возбуждению является вентильное возбуждение АГ большой мощности. При этом использование автономного инвертора позволяет ограничиться для возбуждения АГ конденсаторами меньшей мощности, примерно в пять раз. Схема генерирования тока АГ с вентильным возбуждением показана на рис.2. Где АИН – автономный инвертор напряжения, АБ – аккумуляторная батарея, Ф – фильтр.

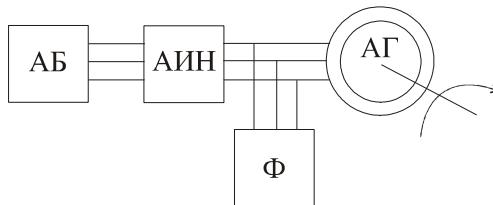


Рис. 2 – Схема генерирования тока АГ с вентильным возбуждением

Для расчета установившихся и переходных режимов АГ на ВЭС используются разные математические модели. В [5] указывается, что при расчете установившихся режимов асинхронной машины обычно используют известную Т-образную схему замещения, которой соответствует следующая система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{1\phi} &= -\underline{E}_\mu + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1; \\ 0 &= \underline{E}_\mu - \underline{I}'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right); \\ \underline{I}_\mu &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При работе асинхронной машины в качестве АГ, она включается не на сеть, а на нагрузку, которая в общем случае является активно-индуктивной $Z_H = R_H + jX_H$. Схема замещения АГ с конденсаторным возбуждением [6] представлена на рис. 3.

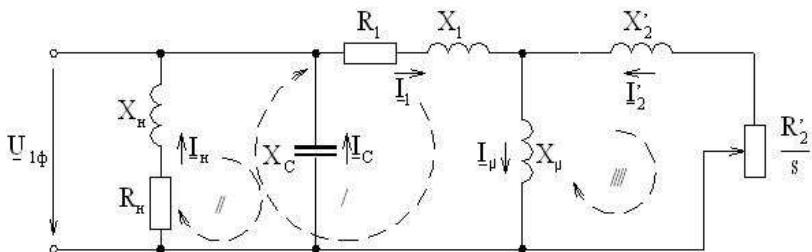


Рис. 3 – Схема замещения автономного асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением

Обозначения на схеме: $U_{1\phi}$ – фазное напряжение статора; I_1 – ток статора; I'_2 – ток ротора, приведенный к обмотке статора; R_1 и X_1 – активное и реактивное сопротивления статора, R'_2 и X'_2 – приведенные активное и реактивное сопротивления ротора; I_μ – ток холостого хода или намагничивающий ток; s – скольжение; $E_\mu = -jX_\mu I_\mu$ – ЭДС холостого хода; X_μ – индуктивное сопротивление взаимоиндукции.

Уравнения, описывающие эту схему, можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} I_H(R_H + jX_H) &= E_\mu - I_1(R_1 + jX_1); \\ 0 &= E_\mu - I'_2 \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right); \\ I_\mu &= I_1 + I'_2; \\ I_1 &= I_H + I_C; \\ (R_H + jX_H)I_H &= jX_C I_C. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где X_C – сопротивление батареи конденсаторов; I_C – ток, протекающий через батарею конденсаторов; I_H – ток нагрузки.

В отличие от АГ, работающего на мощную сеть, для автономного АГ остаются неопределенными частота тока статора f_1 (т.е. скольжение s и реактивные сопротивления АГ) и фазное напряжение $U_{1\phi}$ (т.е. ток нагрузки I_H). К тому же, возникают трудности с определением значения индуктивного сопротивления цепи намагничивания X_μ и, как

следствие, зависимости ЭДС холостого хода от тока холостого хода $E_\mu = f(L_\mu)$.

Поэтому для компьютерного моделирования АГ в составе ВЭС удобно использовать компьютерную модель, представленную в [7]. Остановимся на ней подробнее.

Ветротурбина с асинхронным генератором в составе ветродизельной системы в изолированной электрической сети работает на острове Сейнт Пол, штат Аляска, США с 1999 года. Данная система использует синхронную машину напряжением 480 В, полной мощностью 300 кВА, асинхронный генератор 480 В, 275 кВА, потребительская нагрузка 50 кВт и переменная вторичная нагрузка, изменяющаяся от 0 до 446,25 кВт.

При малых скоростях ветра асинхронный генератор и дизель-синхронный генератор вместе питаю нагрузку. Когда энергия ветра превосходит мощность нагрузки, становится возможным выключить дизель-генератор. Вторичная нагрузка используется для регулирования частоты системы, поглощая избыточную энергию ветра.

В компьютерной модели этой системы блок вторичной нагрузки состоит из восьми наборов трехфазных резисторов соединенных последовательно с GTO тиристорными ключами. Номинальная мощность каждого набора подчиняется бинарной прогрессии таким образом, что нагрузка может изменяться от 0 до 446,25 кВт с шагом 1,75 кВт. GTO тиристоры моделируются идеальными ключами. Регулятор частоты использует стандартную систему частотно-фазовой автоматической подстройки для измерения частоты сети. Измеряемая частота сравнивается с заданной частотой 60 Гц и при этом определяется ошибка по частоте. Эта ошибка интегрируется для вычисления фазовой ошибки. Фазовая ошибка потом используется ПИД-регулятором для получения сигнала выхода, представляющего требуемую мощность вторичной нагрузки. Аналоговый сигнал преобразуется в восьмibитный цифровой сигнал, контролирующий переключение трехфазных резисторов вторичной обмотки трансформатора. Для того, чтобы уменьшить колебания напряжения, переключения производятся при пересечении синусоиды напряжения с горизонтальной осью. Скорость ветра для данного компьютерной модели выбирается 10 м/с, что позволяет ветротурбине производить достаточно мощности, чтобы питать нагрузку. Дизель-генератор (не моделируется) и синхронная машина работает как синхронный компенсатор. В принципе можно рассматривать указанную

компьютерную модель и как работу АГ параллельно с сетью. Демофайл иллюстрирует динамические процессы в системе регулирования частоты, когда включена дополнительная потребительская нагрузка 25 кВт. В соответствии с характеристиками турбины, для скорости ветра 10 м/с, выходная мощность турбины 206 кВт. Благодаря удобству структурного моделирования, достигается хорошая визуализация переходных процессов по всем параметрам системы.

При работе АГ параллельно с сетью при сравнении с СГ в [1] указывается, что АГ требуют менее жестких условий включения, даже может быть включен при значительной разнице в частотах самого АГ и сети. АГ исключают проблему синхронизации с сетью и выпадения из синхронизма, а также не требует защиты от коротких замыканий, так как в этом случае он теряет возбуждение. Более того, в [1] утверждается, что при параллельной работе с сетью для АГ отпадает необходимость в системе самовозбуждения и регулирования напряжения и АГ обеспечивает лучшие качества выходного напряжения по сравнению с СГ.

Однако в [8] сделан вывод, что АГ имеет более высокие пусковые токи при включении генератора на работу параллельно с сетью. Подчеркивается необходимость демпфирования ударных токов и моментов АГ. При подключении их к сети имели место поломки лопастей, отмечалось разрушение подшипников генераторов. Переходные процессы в ВЭС сопровождаются как ударными динамическими моментами, так и ударными токами. Величина ударных токов может в 11 раз и более превышать номинальный ток асинхронного двигателя. Также указывается, что в эксплуатации имели место случаи, когда при переходных процессах происходили поломки лопастей турбины, поломки деталей крепления агрегатов модуля, несанкционированные срабатывания защитной аппаратуры.

Для исследования токов в цепи статора при постоянной частоте вращения ротора АГ возможно использование модели, представленной на рис. 4.

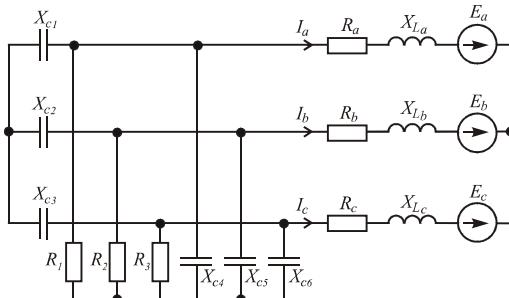


Рис. 4 – Упрощенная модель исследуемой системы

Постановка задачи.

Исходя из вышесказанного, следует постановка цели и задач исследования. Цель статьи – определение основных проблем АГ в составе ВЭС и путей их решения.

В связи с этим, необходимо решить следующие задачи:

- 1) выбрать наиболее достоверную и удобную с точки зрения компьютерного моделирования модель АГ в составе ВЭС;
- 2) провести компьютерное моделирование переходных процессов и установившихся режимов напряжений на зажимах статора, статорных токов, активной мощности ветротурбины, активной мощности, которую потребляет основная и дополнительная нагрузки, а также переходной процесс реактивной мощности;
- 3) исследовать влияние параметров АГ, системы возбуждения и параметров нагрузки на характер переходных процессов по основным координатам системы;
- 4) определить способы регулирования координат АГ в составе ВЭС.

Исследования. Анализ результатов.

В качестве наилучшей компьютерно-интегрированной модели примем модель, указанную в [7] и уже подробно описанную ранее в данной статье.

На рис. 5 показана структурная схема, по которой проводилось моделирование.

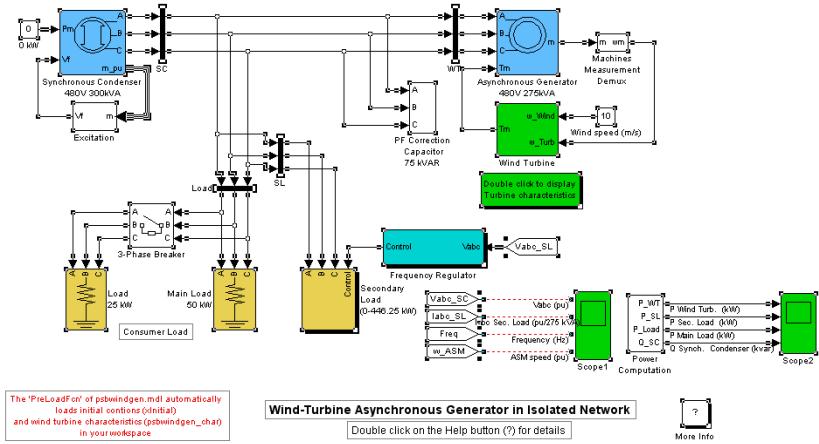


Рис. 5 – Моделируемая структурная схема АГ в составе ВЭС

Моделирование проведем в широко известном пакете прикладных математических программ Matlab с подпрограммой Simulink. Постоянные интегрирования в блоках выбраны в соответствии со стандартными требованиями теории математического моделирования, т.е. на порядок меньше электромагнитной и электромеханической постоянных АГ, а также с учетом значений емкостей коррекции и возбуждения. На рис. 6 представлено семейство характеристик ветротурбины в координатах – частота вращения АГ и мощность турбины.

Параметры АГ: мощность $P = 275$ кВт, линейное напряжение $U_N = 480$ В, частота сети $f = 60$ Гц, параметры статора $R_S = 0,016$ Ом, $L_s = 0,06$ Ом, параметры ротора $R_r = 0,015$ Ом, $L_r = 0,06$ Ом. Взаимная индуктивность обмоток $L_m = 3,5$ мГн, момент инерции $J = 2$ кгм 2 , коэффициент трения $f = 0$, число пар полюсов $p=2$. Параметры явнополюсного СГ (синхронный компенсатор): мощность $P = 300$ кВт, линейное напряжение $U_N = 480$ В, частота $f = 60$ Гц, сопротивления $X_d = 3,23$ Ом, $X_d' = 0,21$ Ом, $X_d'' = 0,15$ Ом, $X_q = 2,79$ Ом, $X_q' = 0,37$ Ом, $X_q'' = 0,09$, $R_S = 0,015$ Ом, $J = 1$ кгм 2 , коэффициент трения $f = 0$, число пар полюсов $p=2$.

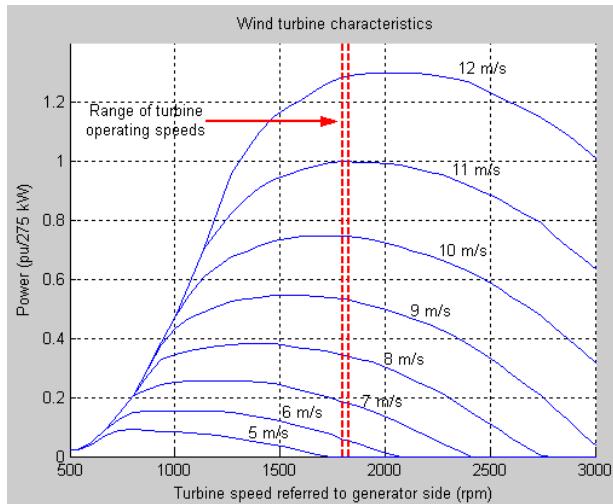


Рис. 6 – Семейство характеристик ветротурбины (пунктиром указан рабочий диапазон частот вращения турбины)

Способы регулирования координат исследуемой системы (статорные токи и напряжения и их частота) – с помощью изменения корректирующей емкости или с помощью ПИД-регулятора, а также комбинация этих двух способов.

На рис. 7 показаны графики переходных процессов (сверху вниз): напряжений, статорных токов, частоты сети и частоты вращения вала АГ. На рис. 8 (сверху вниз) показаны переходные процессы: мощность турбины, мощность вторичной нагрузки, мощность основной нагрузки, реактивная мощность СГ. Напряжения и токи статора практически стабильны, а вот в графиках частот напряжения и вращения ротора АГ, есть небольшая просадка в течение 1 сек. Переходные процессы в исследуемой системе вполне удовлетворительны с точки зрения устойчивости, быстродействия, уровня колебаний. Были исследованы различные сочетания корректирующих емкостей, параметров регулятора частоты, активных и реактивных сопротивлений обмотки статора и ротора АГ на характере переходных процессов.

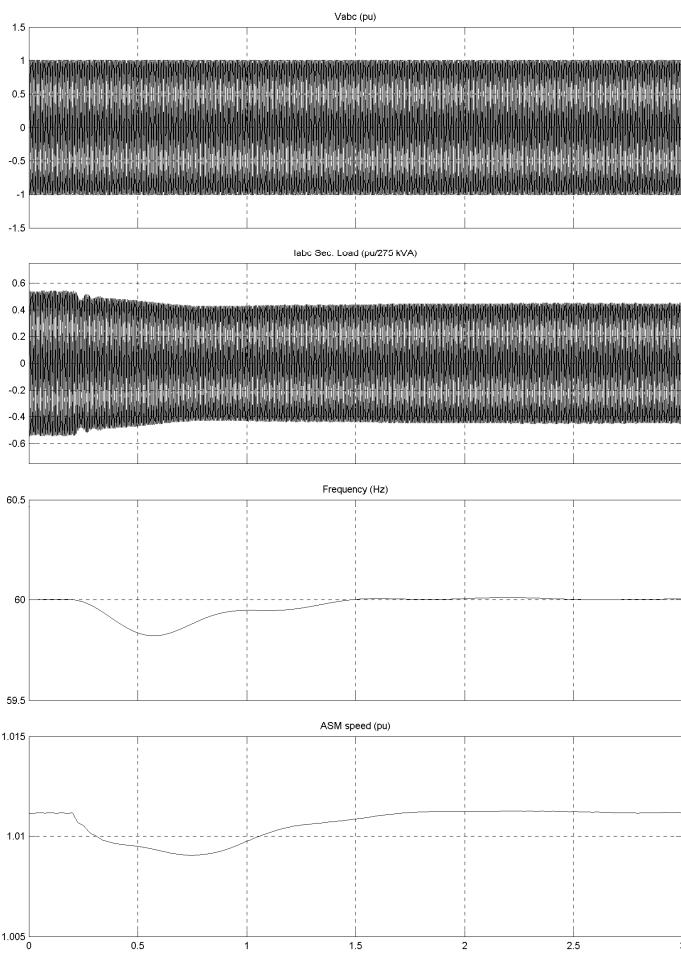


Рис.7 – Переходные процессы в ВЭУ с АГ (напряжения, токи, частота сети и частота вращения ротора АГ

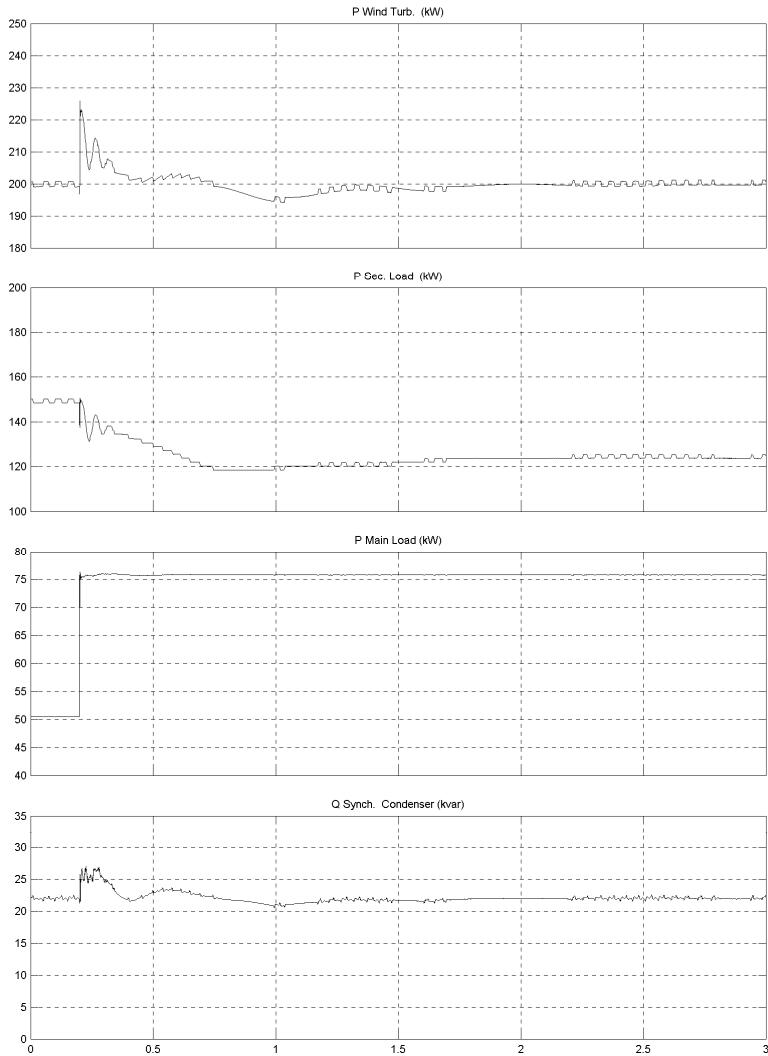


Рис. 8 – Переходные процессы в ВЭУ с АГ (мощность ветротурбины, мощность дополнительной нагрузки и основной, реактивная мощность СГ)

Выводы. Рост нагрузки в системе должен сопровождаться ростом корректирующих емкостей, однако зависимость между значением емкости и ростом нагрузки нелинейна и напоминает кривую насыщения. Оптимальная емкость в рассматриваемой системе приблизительно соответствует формуле (1).

Изменения параметров ПИД-регулятора частоты, как показали исследования, могут значительно смягчать механические характеристики, что обеспечивает более плавные переходные процессы, снижает динамические нагрузки, уменьшает потери и увеличивает надежность, срок эксплуатации и КПД, но при этом замедляет быстродействие системы ВЭС с АГ.

Изменения параметров обмоток статора и ротора АГ, как правило, приводят к небольшому увеличению колебательности, но снижаются частоты колебаний, т.е. снижаются вибрации, что особенно важно для механической части ВЭС.

Список литературы: 1. Неисчерпаемая энергия. Кн.1. Ветроэлектрогенераторы / В.С.Кривцов, А.М. Алеников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац.аэрокосм.ун-т «Харьк.авиац. ин-т», Севастополь: Севаст.нац.техн.ун-т, 2003. - 400 с. 2. Неисчерпаемая энергия. Кн.2. Ветроэнергетика / В.С.Кривцов, А.М. Алеников, А.И. Яковлев. – Учебник. – Харьков: Нац.аэрокосм.ун-т «Харьк.авиац. ин-т», Севастополь: Севаст.нац.техн.ун-т, 2004. -519 с. 3. Кацман М. М. Электрические машины и трансформаторы. – М.: 1971, с. 4. П.Д. Лежнюк, Р.В.Никиторович, Жан-Пьер Нгома Компенсация реактивной мощности асинхронных генераторов на малых гидроэлектростанциях // Энергетика и электротехника. Наукові праці. – ВНТУ, 2008. – №2 , с.1-7. 5. Вольдек А.И. Электрические машины. 2-е изд. – Л.: Энергия, 1974. С.507-509, С.590-592. 6. Вокин И. А. Совершенствование источника питания автономной системы электроснабжения на основе асинхронного вентильного генератора. Автографат на соискание степени канд.техн.наук., – Саратов, 2008. 7. R. Gagnon, B. Saulnier, G. Sybille, P. Giroux; "Modeling of a Generic High-Penetration No-Storage Wind-Diesel System Using Matlab/Power System Blockset" 2002 Global Windpower Conference, April 2002, Paris, France. 8. Дорохов А.Г. Снижение динамических перегрузок с целью повышения надежности асинхронных генераторов ветроэлектроагрегатов, работающих параллельно с сетью. Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук, –Харьков, 2005.

Bibliography (transliterated): 1. *Neischerpaemaya energia. Book 1. Vetroelectrogeneratory* V.S.Krivstov, A.M. Aleinikov, A.I. Yakovlev. – Uchebnik. – Kharkov: Nats.aerocosm. un-t «Khark.aviats. in-t», Sevastopol: Sevast.nats.tekh.un-t. 2003. – 400 c. 2. *Neischerpaemaya energia. Book 2. Vetroelectrogeneratory* V.S.Krivstov, A.M. Aleinikov, A.I. Yakovlev. – Uchebnik. – Kharkov: Nats.aerocosm. un-t «Khark.aviats. in-t», Sevastopol: Sevast.nats.tekh.un-t, 2004. – 519 c. 3. Katsman M. M. *Elektricheskie mashiny i transformatory.* – M.: 1971. 4. P.D. Lezhnyuk, R.V.Nikitorovich, Jan-Pierre Ngoma *Kompensatsia reaktivnoy moshchnosti asinkhronnykh generatorov na malykh gidroelektrostantsiyakh.* Energetika i elektrotehnika. Naukovi pratsi. – VNTU, 2008. – № 2, p. 1-7. 5. Voldek A.I. *Electricheskie mashiny.* 2-e izd. – L.: Energia, 1974. PP. 507-509, 590-592. 6. Vokin I. A. *Sovershenstvovanie istochnika pitaniia avtonomnoy sistemy electrosnabzheniya na osnove asynchronnogo ventilnogo generatora.* Avtoreferat na soiskanie stepeni kand.tekhn.nauk., – Saratov, 2008. 7. R. Gagnon, B. Saulnier, G. Sybille, P. Giroux; "Modeling of a Generic High-Penetration No-Storage Wind-Diesel System Using Matlab /

Power System Blockset" 2002 Global Windpower Conference, April 2002, Paris, France. 8. Dorokhov A.G. *Snijenie dinamicheskikh peregruzok s tselyu povysheniya nadezhnosti asinkhronnykh generatorov vetroelecstroagregatov, rabotauchikh parallelno s setyu.* Dissertatsiy na soiskanie stepeni kand.tekhn.nauk., – Kharkov, 2005.

Поступила (received) 09.04.2015



Марков Владислав Сергеевич, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера электромеханика в 1994 году в Харьковском государственном политехническом университете по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок», диссертацию кандидата технических наук в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» по специальности «Электротехнические комплексы и системы» в 2001 г. Доцент кафедры общей электротехники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» с 2003 года. Научные интересы связаны с расчетом динамических процессов в электротехнических устройствах.



Поляков Игорь Владимирович, доцент, кандидат технических наук. Защитил диплом инженера электромеханика в 1988 году в Харьковском политехническом институте по специальности «Электрические машины и аппараты», диссертацию кандидата технических наук в Национальном техническом университете «Харьковский политехнический институт» по специальности «Электрические машины и аппараты» в 1999 г. Доцент кафедры общей электротехники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» с 2001 года. Научные интересы связаны с моделированием и расчетом электрических и магнитных цепей в электрических машинах и аппаратах.



Кожемякин Сергей Михайлович – старший преподаватель. Защитил диплом инженера-криофизика в 1982 году в Харьковском политехническом институте по специальности «Электрические машины и аппараты». Старший преподаватель кафедры общей электротехники Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» с 1992 года. Научные интересы связаны с проектированием и исследованием электрических машин.

В.В. МИХАЙЛЕНКО, канд. тех. наук, ст. викл. НТУУ "КПІ", Київ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ
У НАПІВПРОВІДНИКОВОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ
З СЕМИЗОННИМ РЕГУлюванням Вихідної напруги
І ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ**

Розроблено нові математичні моделі електромагнітних процесів у трифазних електрических колах напівпровідникових перетворювачів з багатоканальним зонним регулюванням фазних напруг без урахування енергетичних втрат у напівпровідникових комутаторах для швидкої оцінки впливу параметрів навантаження на рівень і форму вихідної напруги.

Ключові слова: електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм, двигун постійного струму, метод багатопараметричних модулюючих функцій.

Вступ. Тенденції якісного перетворення електричної енергії, а також успіхи у розвитку напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі [1-10]. У роботах [1-4] показана доцільність використання структур перетворювачів частоти (ПЧ) з однократною модуляцією при побудові систем вторинного електропостачання для комплексів діагностики електромеханічних пристрій із різноманітним видом вхідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз аспекту використання тієї ж структури ПЧ для електромеханічних комплексів із широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) постійної напруги при семизонному керуванні.

Метою роботи є виконання аналізу електромагнітних процесів в електрических колах з напівпровідниковими комутаторами і розробка математичної моделі напівпровідникового перетворювача (НПП) з електромеханічним навантаженням.

Аналіз електромагнітних процесів. Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМА, СМВ, СМС – силові модулятори (СМ) фазних *A*, *B* і *C* відповідно, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження; *D* – двигун постійного струму. Сукупність СМ, підключених до енергетичної мережі паралельно і з'єднаних по виходу послідовно, представляє собою ланку високої частоти перетворювача.

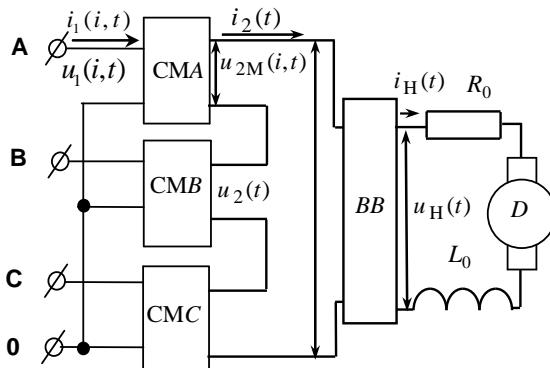


Рис. 1 – Структурна схема НПП з електромеханічним навантаженням

Порівняльні дослідження техніко-економічних показників різного виду виконавчих елементів слідкуючих систем на основі високомоментних двигунів постійного струму (ДПС) серій 2П та ПВ і трифазних асинхронних двигунів серії 4А, які випускаються промисловістю серійно [4], показують, що за умови однакових показників за масою та габаритами в діапазоні потужностей від 100 Вт до 500 кВт, у слідкуючих системах доцільніше використовувати ДПС.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використаємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [5], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди інверторів випрямленої напруги (ІВН) представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної напруги не мають втрат.

Проведення системного аналізу електромагнітних процесів у модуляційному НПП з багатозонним регулюванням вихідної напруги з навантаженням у вигляді ДПС з послідовним збудженням, з урахуванням таких ознак системного підходу до аналізу [4], як цілісність та вплив під час її руху зовнішніх і внутрішніх факторів.

Вихідну напругу НПП знаходимо з виразу виду

$$u_H(t) = \frac{1}{k_T} \sum_{n=1}^{N=7} \sum_{i=1}^3 u_i(i,t) \psi_B(i,t) \psi(n,N,t) \psi_{BB}(t), \quad (1)$$

де $u_1(i, t)$ – миттєві значення фазних напруг мережі, $\Psi_B(i, t)$ – функції прямокутного синуса, що співпадають за часом з положенням відповідних фазних напруг. $n = 1, 2, 3, \dots, N$ – номери зон регулювання вихідної напруги; $\Psi(n, N, t)$ – множина еквівалентних модулюючих впливів i -х інверторів СМ; $\Psi_{BB}(t)$ – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням напруги $u_2(t)$ ланки високої частоти НПП; k_t – коефіцієнт трансформації трансформаторів СМ.

ДПС, що задає вихідний струм НПП, описується системою алгебраїчних рівнянь [4], яка подає миттєві значення струму кола якоря та його кутової швидкості з урахуванням пускового режиму у вигляді

$$\begin{pmatrix} i_{H_k}(t) \\ i_{H_{k+1}}(t) \\ n_k(t) \\ n_{k+1}(t) \end{pmatrix} = \begin{cases} i_{H_k}(t) + \frac{2(c(t) - \epsilon_{ch})}{a_1} - \frac{2\epsilon_a}{a_1} i_{H_k}(t) - \\ - \frac{2}{a_1} n_k(t) i_{H_k}(t) - \frac{2}{a_1 a_3} \dot{i}_{H_k}(t); \\ n_k(t) + \frac{4(c(t) - \epsilon_{ch}) i_{H_k}(t)}{a_1 a_3} - \\ - \frac{2\epsilon_M}{a_3} n_k(t) + \frac{2}{a_3} \dot{i}_{H_k}^2(t) - \\ - \frac{2}{a_1 a_3} \dot{i}_{H_k}^2(t) n_k(t) - \frac{2\epsilon_M 0}{a_3}, \end{cases} \quad (2)$$

де $i_{H_k}(t)$, $i_{H_{k+1}}(t)$, $n_k(t)$, $n_{k+1}(t)$ – струм якоря та кутова швидкість обертання ДПС на k -ому та в $k+1$ -ому інтервалі відповідно; ϵ_{ch} , ϵ_a – відносні падіння напруги на щітках і обмотці якоря; ϵ_M , ϵ_{M0} – відносні моменти опору на валу; $c(t) = \frac{u_H(t)}{E}$ – відносне значення напруги на якорі; $u_H(t)$ та E – відповідно миттєві значення вихідної напруги НПП та проти ЕРС; $a_1 = \epsilon_a + \frac{2T_{ab}}{\Delta t}$, $a_3 = \epsilon_M + \frac{2T_M}{\Delta t}$; T_{ab} та T_M – електромагнітна та механічна постійні часу двигуна, Δt – інтервали часу, за якими проводяться розрахунки процесів.

Система (2) вирішується за допомогою методу припасовування з попереднім записом початкових умов при $t = 0$ та припущеннями щодо лінійної залежності моменту опору на валу двигуна від швидкості обертання [3] і лінеаризованої кривої намагнічування.

Діаграми струмів кола якоря ДПС для випадку семизонного регулювання вихідної напруги НПП наведені на рис. 2. Крива 1 відображає струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією максимальної величини напруги (3), а крива 2 – струм кола якоря в процесі пуску ДПС під дією напруги (3) з семизонним широтно-імпульсним регулюванням (ШІР) за лінійним законом.

Вихідний струм $i_2(t)$ знаходимо з співвідношення

$$i_2(t) = i_{H_k}(t)\psi_{BB}(t). \quad (3)$$

Вхідні струми $i_l(n, i, t)$ знаходимо з виразу

$$i_l(n, i, t) = \frac{i_2(t)\psi_B(i, t)\psi(n, N, t)}{k_T}, \quad (4)$$

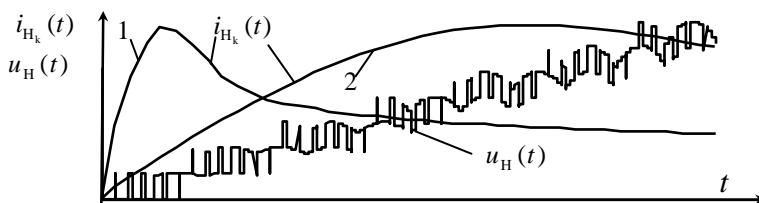


Рис. 2 – Діаграми струмів кола якоря ДПС

Для визначення струмів i -х фаз мережі у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги НПП підсумуємо вхідні струми IBН, що беруть участь у процесі регулювання вихідної напруги в кожній з i -ї фазі. Загальний вираз для струмів i -х фаз мережі подамо у вигляді

$$i_l(i, t) = i_l(1, i, t) + i_l(2, i, t) + \dots + i_l(N, i, t), \quad (5)$$

де: $i_l(1, i, t)$, $i_l(2, i, t)$, $i_l(N, i, t)$ – вхідні струми інверторів i -х фаз на інтервалах першої, другої, та N -ї зони регулювання.

Діаграми вхідних струмів та напруг, побудовані за (5), представлені на рис. 3.

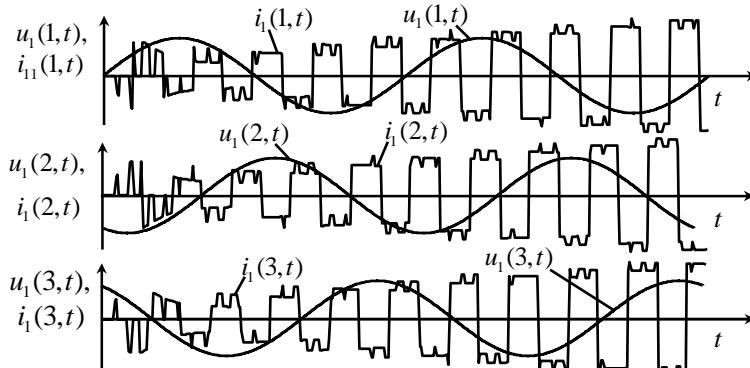


Рис. 3 – Діаграми вхідних струмів i -х фаз мережі в координатах фазних напруг

Висновки. Таким чином у данні роботі було виконано аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами. Використовуючи метод багатопараметричних модулюючих функцій було знайдено струм і напругу навантаження, а також вхідні струми перетворювача.

Створено нові схемотехнічні рішення напівпровідниковых комутаторів з високочастотним широтноімпульсним регулюванням їх вихідної напруги при зміні параметрів навантаження в широких межах, які дозволили підвищити швидкодію електротехнологічних систем.

Список літератури: 1. Макаренко М.П. Аналіз електромагнітних процесів у модуляційному напівпровідниковому перетворювачі напруги з електромеханічним навантаженням / М.П. Макаренко, В.В. Михайлenco // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2003. – Ч. 3. – С. 21-24. 2. Макаренко М.П. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачах з багатозонним регулюванням вихідної напруги функціями багатопараметричного виду / М.П. Макаренко, В.В. Михайлenco // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2002. – Ч. 1. – С. 19-22. 3. Макаренко Н.П. Анализ и моделирование электромагнитных процессов в силовых преобразовательных устройствах методом модулирующих функций / Н.П. Макаренко // Техн. електродинаміка. Системи електроживлення електротехнических установок і комплексів. – Темат. вип. – 1999. – С.44-47. 4. Макаренко М.П. Деякі аспекти комп’ютерного аналізу напівпровідникових перетворювачів електроенергії з багаторозгалуженими структурами / М.П. Макаренко, В.В. Михайлenco // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2004. – Ч. 1. – С. 112-115. 5. Макаренко Н.П. Математическая модель процесса формирования выходных напряжений преобразователей частоты / Н.П. Макаренко, Г. Абара // Электроника и связь. – 1999. – № 6, Т. 2. – С. 60-64. 6. Макаренко М.П. Системний аналіз електромагнітних процесів у напівпровідникових перетворювачах електроенергії модуляційного типу / М.П. Макаренко, В. Сенько, М.М. Юрченко – К. : НАН України, ІЕД, 2005. – 241 с. 7. Макаренко Н.П. Экологические

вопросы сетей вторичных систем электроснабжения промышленных предприятий / Н.П. Макаренко, Г. Абарка, Е.В. Неборам // Вісник УБЕНТЗ. – 1999. – №5. – С. 7-12. **8.** Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD, *IEEE Trans. On Industrial Electronics*, 2011, vol. 58, no. 3, pp. 949-959. **9.** Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang. Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter, *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 575-584. **10.** Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. Range of the linear modulational in matrix converters, *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2014, vol. 29, no. 6, pp. 3166-3178.

Bibliography (transliterated): **1.** Makarenko M.P. Mykhailenko V.V. "Analiz elektromahnitnykh protsesiv u moduliatsionomu napivprovodnykovomu peretvoruvachi napruhy z elektromekhanichnym navantazhenniam". *Tekhn. elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta enerhoelektryvnist'*. 3 (2003): 21-24. Print. **2.** Makarenko M.P., Myxajlenko V.V. "Analiz elektromahnitnyx procesiv u peretvorjuvachax z bahatozonnym rehuljuvannjam vyxidnoji napruhy funkijamy bahatoparametrychno vydru". *Texn. elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta enerhoelektryvnist'*. 1 (2002): 19-22. Print. **3.** Makarenko N.P. "Analiz i modelirovaniye jelektromagnitnyh processov v silovyh preobrazovatel'nyh ustroystvah metodom modulirujushhih funkij". *Texn. elektrodynamika. Systemy elektrozvyvlenija elektrotexničnyx ustyanovok i kompleksiv*. 1999: 44-47. Print. **4.** Makarenko M.P., Mykhailenko V.V. "Deiaki aspekty kompiuternoho analizu napivprovodnykovykh peretvoruvachiv elektroenerhii z bahatorozhaluzhenymy strukturamy". *Tekhn. elektrodynamika. Tem. vyp. "Sylova elektronika ta enerhoelektryvnist'*. 1 (2004): 112-115. Print. **5.** Makarenko N.P., Abarka G. "Matematicheskaja model' processa formirovaniya vyhodnyh naprijazhenij preobrazovatelej chastoty". *Jelektronika i sviaz'*. 6 (2) (1999): 60-64. Print. **6.** Makarenko M.P., Senko V., Yurchenko M.M. *Systemnyi analiz elektromahnitnykh protsesiv u napivprovodnykovykh peretvoruvachakh elektroenerhii moduliatsionoho typu*. Kiyv: NAN Ukrayny, IED, 2005. Print. **7.** Makarenko N.P., Abarka G., Nebrat. E.V. "Jekologicheskie voprosy setej vtorichnyh sistem jelektrosnabzenija promyshlennyh predpriyatiij". *Visnik UBENTZ*. 5 (1999): 7-12. Print. **8.** Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang "A Generalized Technique of Modeling, Analysis, and Control of a Matrix Converter Using SVD". *IEEE Trans. On Industrial Electronics*. Vol 58. No 3 (2011): 949-959. Print. **9.** Hossein Hojabri, Hossein Mokhtari and Luichen Chang "Reactive power control permanent-magnet synchronous wind generator with matrix converter". *IEEE Trans. On Power Delivery*. Vol 28, No 2. 575-584. Print. **10.** Zarri, L., Mengoni, M., Toni, A. and Ojo, J.O. "Range of the linear modulational in matrix converters". *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol 29, No 6 (2014): 3166-3178. Print.

Поступила (received) 29.12.2014



Михайленко Владислав Володимирович, кандидат технічних наук. Захистив диплом магістра за спеціальністю "Електричні машини та апарати", дисертацію кандидата технічних наук у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за спеціальністю "Теоретична електротехніка" у 2014 році. Старший викладач кафедри "Теоретичної електротехніки" НТУУ "КПІ" з 2014 року. Наукові праці пов'язані з проблемами напівпровідникових перетворювачів з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги.

C.B. ГРЕЦКИХ, м.н.с., Институт технических проблем
магнетизма НАН Украины, Харьков

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ ДОМОВ НА УРОВЕНЬ ОСЛАБЛЕНИЯ
ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИЯХ**

Показано, что использование в строительстве стандартного арматурного проката приводит к опасному ослаблению геомагнитного поля в помещениях. Определены требования к магнитной проницаемости "слабомагнитной" конструкционной стали ($\mu_r > 70$), применение которой в жилищном строительстве позволит обеспечить комфортные условия проживания по магнитному полю.

Ключевые слова: магнитная проницаемость, конструкционная сталь, ослабление геомагнитного поля, железобетонные строительные конструкции.

Введение. Известно [1], что стальная арматура железобетонных конструкций современных жилых домов намагничивается в геомагнитном поле (ГМП) и ослабляет естественное ГМП в помещениях, что представляет угрозу для здоровья населения [2]. Поэтому актуальной является задача нормализации ГМП в жилых домах до безопасного уровня [3] – не меньше 90% естественного ГМП (индукции 45 мкТл) при естественной индукции ГМП в 50 мкТл для широтной зоны Украины.

Эффективным методом нормализации ГМП в помещениях может быть использование в строительстве специальной конструкционной стали с уменьшенной магнитной проницаемостью [4]. Однако магнитные характеристики конструкционных сталей, а также их влияние на уровень ослабления ГМП в помещениях, исследованы не достаточно. Это не позволяет сформулировать обоснованные требования к магнитной проницаемости специальной "слабомагнитной" конструкционной стали, применение в строительстве которой позволит ограничить ослабление ГМП на допустимом уровне.

Целью настоящей работы является определение максимально допустимого значения относительной магнитной проницаемости арматурного проката железобетонных конструкций домов, при

© С.В. Грецких, 2015

котором уровень ослабления естественного ГМП в помещениях не превышает безопасного значения 10 %.

Исследования проведем на примере цилиндрической железобетонной колонны, армированной арматурой из конструкционной стали, применяя предложенный в [4] аналитический метод моделирования магнитостатического поля для задач с осевой симметрией, а затем для предложенной в [5, 6] физической модели помещения каркасно-монолитного жилого дома на основе численного моделирования в программной среде Comsol Multiphysics. При анализе предполагаем, что на конструкцию действует только естественное статическое ГМП. Остаточная намагниченность материала конструкции отсутствует.

Исследование влияния железобетонной колонны на уровень ослабления ГМП. Вначале определим рабочие значения магнитной проницаемости применяемой для строительства конструкционной стали [7, 8] при ее намагничивании в ГМП. Для этого используем полученные на основе [9, 10, 11], а также на основе выполненных лабораторных исследований, зависимости магнитной проницаемости конструкционной стали от напряженности намагничивающего магнитного поля (кривые 1 на рис.1).

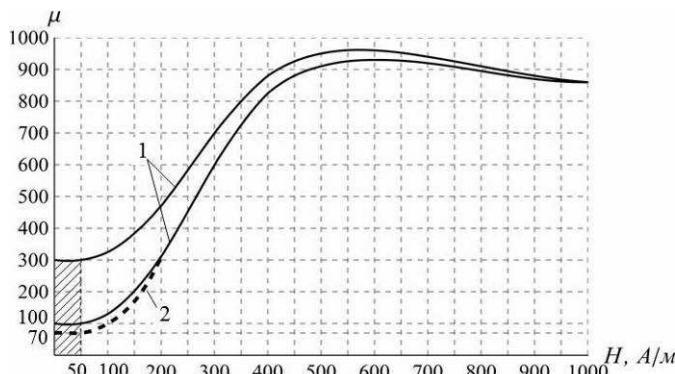


Рис. 1 – Зависимость магнитной проницаемости используемых в строительстве конструкционных сталей от напряженности намагничивающего магнитного поля (кривые 1) и значение магнитной проницаемости для рекомендуемой "слабомагнитной" стали (кривая 2)

Как следует из рис. 1, в слабом ГМП с индукцией 50 мкТл, рабочий диапазон напряженности намагничивающего поля не превышает 50 А/м (заштрихованная область на рис. 1), при котором

магнитная проницаемость материала слабо зависит от напряженности ГМП и может быть принята равной начальной магнитной проницаемости μ_0 с разбросом 100-300.

Магнитную проницаемость материала стальных конструкций при исследовании варьируем в диапазоне 33-300 единиц. При этом переход от сплошной стальной конструкции объемом V_K к армированной стальными прутьями железобетонной конструкции с суммарным объемом ферромагнитных элементов V_Φ , осуществляя на основе предложенной в [6] методики эквивалентной замены сложной многоэлементной железобетонной конструкции на сплошную конструкцию с аналогичной внешней граничной поверхностью и объемом, которая с ограниченной погрешностью [6] может быть охарактеризована эквивалентной магнитной проницаемостью μ_e :

$$\mu_e \approx \mu_0 \cdot K_V; \quad K_V = \frac{V_\Phi}{V_K}, \quad (1)$$

где K_V – коэффициент заполнения [7, 8], который для железобетонных колон и межэтажных перекрытий варьируется в диапазоне фактических значений 0,05-0,15.

Анализ проведем для современных каркасно-монолитных жилых домов, значение K_V для колонн и межэтажных перекрытий которых составляет 0,15 [7, 8]. При этом значение μ_e в соответствии с (1) и разбросе μ_0 от 33 до 300 варьируется в диапазоне 5-45.

Интенсивность ослабления ГМП цилиндрической железобетонной колонной высотой h и радиусом r будем оценивать в соответствии с [4], используя коэффициент гипогеомагнитности колонны K_{GK} , который равен объему V_{Gn} , отнесеному к кубу радиуса r колонны:

$$K_{GK} = V_{Gn} / r^3, \quad (2)$$

где V_{Gn} – объем пространства вблизи колонны, в котором интенсивность ослабления ГМП превышает предельно допустимое значение 10% и составляет менее 45 мкТл.

На основе применения предложенного авторами в [4] аналитического метода моделирования магнитостатического поля для задач с осевой симметрией, на рис. 2 представлены полученные зависимости влияния магнитной проницаемости материала колонны на интенсивность ослабления ГМП, характеризуемого коэффициентом K_{GK} , при изменении относительной протяженности колонны в диапазоне b (1-40).

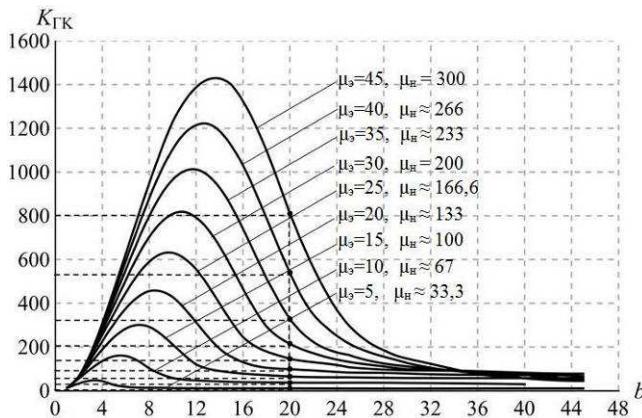


Рис. 2 – Зависимость коэффициента гипогеомагнитности $K_{\text{ГК}}$ цилиндрической стальной колонны от относительной протяженности колонны b при $K_V=0,15$, $G_n=0,9$ и разных значениях магнитной проницаемости

Как следует из рис. 2, уменьшение относительной начальной магнитной проницаемости μ_n материала колонны приводит к монотонному уменьшению $K_{\text{ГК}}$, характеризующего интенсивность ослабления ГМП, который при μ_n менее 70 и характерном для помещений жилых домов значении $b = 20$ [6], становится близким к нулю.

Искомое значение магнитной проницаемости специальной конструкционной стали, использование которой в железобетонных колоннах позволяет исключить опасное ослабление ГМП, найдем из кривых на рис. 3, которые построены по данным рис. 2 и $b = 20$ для разных значений K_V . Заштрихованная на рис. 3 зона нечувствительности позволяет исключить из анализа несущественные значения $K_{\text{ГК}} < 40$, находящиеся на уровне погрешности используемых методов анализа.

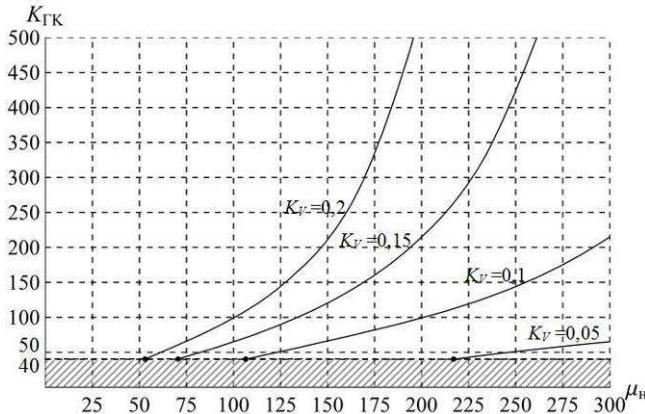


Рис. 3 – Зависимость $K_{ГК}$ от начальной магнитной проницаемости конструкционной стали μ_h при разных значениях коэффициента заполнения K_V , $b=20$, $G_n = 0,9$

Как следует из рис. 3, при значениях $K_V=0,15$, типичных для наиболее распространенных каркасно-монолитных жилых домов [12], искомое значение μ_h составляет менее 70 и соответствует кривой 2 на рис. 1.

Полученные выводы с приемлемой для инженерной оценки погрешностью могут быть распространены и на железобетонные колонны прямоугольной формы.

Исследование влияния железобетонной конструкции каркасно-монолитного дома на уровень ослабления ГМП. Исследование выполнялось на основе математического моделирования в программной среде Comsol Multiphysics распределения индукции ГМП в помещении дома с железобетонными колоннами и перекрытиями на основе физической модели [5, 6] ферромагнитной конструкции (рис. 4, а), учитывающей взаимное магнитное влияние охватывающих помещение колонн и перекрытий. Распределение магнитной индукции моделировалось в горизонтальной плоскости, расположенной на высоте 0,5 м от пола помещения, а также в вертикальной плоскости, проходящей через оси колонн, при значениях $\mu_h = 300$ и $\mu_h = 67$ и коэффициенте K_V равном 0,15.

Для построения трехмерной модели был использован модуль "Magnetic Fields, No Currents (mfnc)". При этом расчетная область представляла собой прямоугольный параллелепипед с размерами $a=10\text{м}$; $b=8\text{м}$; $c=8\text{м}$ (рис. 4, б). При моделировании использовалась

сетка типа "Free Triangular", размером "Extra fine" (максимальный размер элемента сетки – 0,3 м; минимальный – 0,05 м).

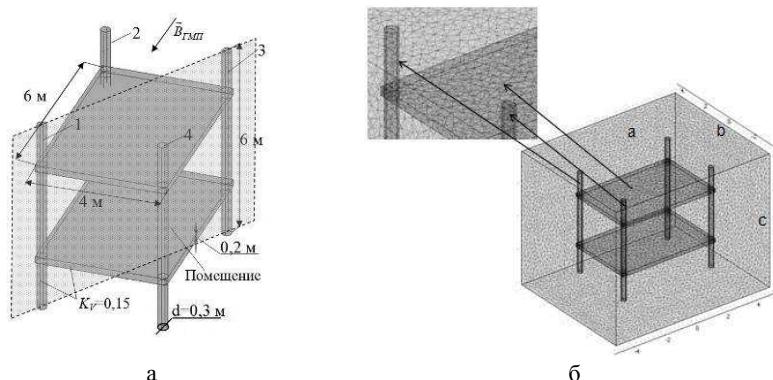


Рис. 4 – Железобетонная конструкция помещения: а – физическая модель; б – трехмерная расчетная модель магнитного поля в программной среде COMSOL Multiphysics

Результаты моделирования распределения ГМП в помещении в виде карт распределения магнитной индукции в горизонтальной плоскости и в вертикальной плоскости представлены на рис. 5 и рис. 6 соответственно.

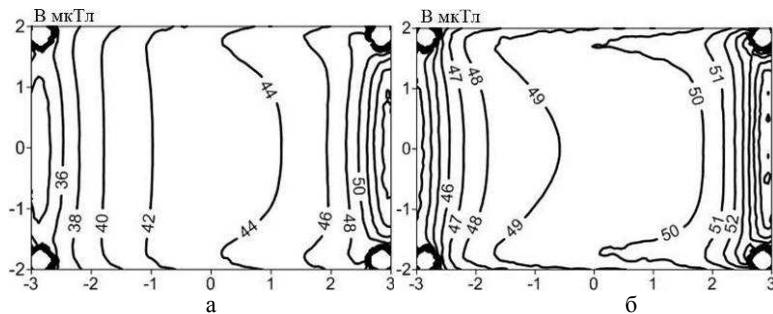


Рис. 5 – Распределение индукции МП в помещении на высоте 0,5 м от поверхности пола: а – при использовании стандартной конструкционной стали $\mu_h=300$, $\mu_s=45$; б – при использовании специальной конструкционной стали $\mu_h=67$, $\mu_s=10$

Как следует из результатов моделирования, при использовании стандартной конструкционной стали с $\mu_h=300$ (рис. 5,а и рис. 6,а), наблюдается опасное ослабление ГМП в помещении (до индукций 35 мкГл), что составляет 65% естественного ГМП при нормативе 90%. Указанные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований, приведенных [5], что подтверждает правильность выполненного выше анализа.

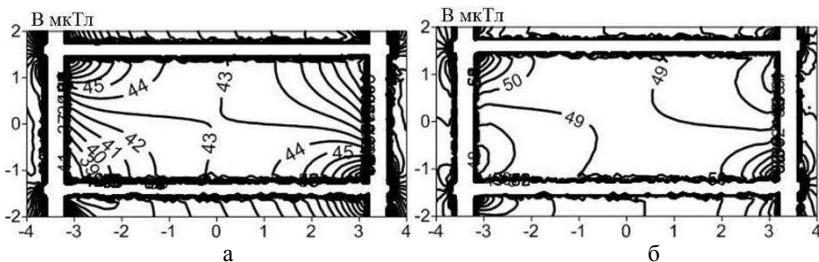


Рис. 6 – Распределение индукции ГМП в помещении в вертикальной плоскости, проходящей через оси колонн 1, 3 (рис.4,а): а – при использовании стандартной конструкционной стали $\mu_h=300$, $\mu_s=45$; б – при использовании специальной конструкционной стали $\mu_h=67$, $\mu_s=10$

Как следует из результатов моделирования, при использовании предлагаемой специальной конструкционной стали с $\mu_h=67$ (рис. 5,б и рис. 6,б) ослабление ГМП в помещении нормализуется до значений индукции не менее 46 мкГл, что соответствует безопасным и комфортным условиям проживания в соответствии с [3].

Полученные результаты подтверждают эффективность использования при строительстве домов специальной "слабомагнитной" конструкционной стали с начальной эквивалентной магнитной проницаемостью $\mu_s < 10$ ($\mu_h < 70$), что позволит нормализовать ГМП в помещении до комфортного для проживания уровня с индукцией не менее 45 мкГл. Однако при этом целесообразно одновременное использование метода размагничивания стальных строительных конструкций перед их монтажом [12] для снятия остаточной намагниченности.

Практическая реализация рассмотренного метода нормализации ГМП связана с освоением в Украине технологии серийного производства специальной "слабомагнитной" конструкционной строительной стали с нормированным значением начальной магнитной

проницаемости $\mu_n < 70$ и организации ее внедрения в строительные технологии.

Выводы. 1. Впервые, на основе разработанных методов моделирования явления ослабления естественного геомагнитного поля (ГМП) стальными конструкциями, проведены исследования влияния магнитной проницаемости отдельных элементов железобетонных конструкций, выполненных из конструкционной стали, а также строительной конструкции в целом, на уровень ослабления ГМП в помещениях современных жилых домов.

2. Показано, что использование в строительстве домов стандартного стального арматурного проката, относительная начальная магнитная проницаемость которого имеет разброс от 100 до 300 единиц, может привести к ослаблению индукции ГМП в помещениях до опасных значений менее 35 мкТл, при допустимом уровне 45 мкТл.

3. Впервые определены требования к начальной магнитной проницаемости специальной "слабомагнитной" конструкционной стали ($\mu_n < 70$), применение которой в жилищном строительстве позволит снять проблему опасного ослабления естественного ГМП в помещениях, вызванного индуцированной ГМП намагниченностью ферромагнитных элементов строительных конструкций.

Список литературы: 1. Розов В.Ю. Исследование техногенных искажений геомагнитного поля в жилых и производственных помещениях и определение путей их снижения до безопасного уровня / В.Ю. Розов, М.М. Резинкина, Ю.Д. Думанский, Л.А. Гвозденко // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 2. – С. 3-8. 2. Сердюк А.М. Екологічна значущість геомагнітного поля та медично-біологічні передумови гігієнічної регламентації його ослаблення в умовах України / А.М. Сердюк, П.Є. Григор'єв, В.Я. Акіменко, С.В. Протас // Довкілля і здоров'я. – 2010. – № 3. – С. 8–11. 3. Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2008 – [acting from July 2008]. – Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN, 2008. – 5 р. <<http://www.createhealthyhomes.com/SBM-2008.pdf>>. 4. Розов В.Ю. Исследование явления ослабления статического геомагнитного поля стальной колонной / В.Ю. Розов, С.Ю. Резуцкий, С.В. Левина // Техническая электродинамика. – 2014. – № 1. – С. 12-19. 5. Розов В.Ю. Экспериментальные исследования явления ослабления статического геомагнитного поля в помещениях / В.Ю. Розов, Д.Е. Пелевин, С.В. Левина // Электротехника и электромеханика. – 2013. – №6. – С. 72-76. 6. Розов В.Ю. Моделирование статического геомагнитного поля внутри помещений современных жилых домов / В.Ю. Розов, С.В. Левина // Техническая электродинамика. – 2014. – № 4. – С. 8-10. 7. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення: ДБН В.2.6698:2009 – [Чинний від 2011-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд України 2011 – 71 с. – (Національний стандарт України). 8. Прокат арматурний для залізобетонних конструкцій. Загальні технічні умови (ISO 6935-2:1991, NEQ): ДСТУ 3760:2006 – [Чинний від 2007-10-01]. – К.: Держспоживстандарт України 2007 – 28 с. – (Національний стандарт України). 9. Кувалдин А.Б. Особенности

расчета параметров электромагнитного поля в ферромагнитной стали / А.Б. Кувалдин // Промышленный электрообогрев и электроотопление. – 2014. – №2. – С. 26-30. **10.** Березков Б.Н. Конструкционные материалы. Часть 1. Стали и сплавы: Метод. указания / Б.Н. Березков, А.В. Архипов. – С.: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. – 16 с. **11.** Прийма М.В. Магнитные характеристики стали СтЗ при температуре 4,2-300 К / М.В. Прийма, Л.С. Ширшов, П.А. Щербаков. – С. : Препринт ИФВЭ 87-173., 1987. – 8 с. **12.** Розов В.Ю. Методы нормализации статического геомагнитного поля в жилых домах / В.Ю. Розов, А.В. Завальний, С.М. Золотов, С.В. Гречихин // Електротехніка і електромеханіка. – 2015. – №2. – С. 35-40.

Bibliography (transliterated): **1.** Rozov V.Yu., Rezinkina M.M., Dumanskiy Yu.D., Gvozdenko L.A. "Issledovanie tekhnogennykh iskazhenii geomagnitnogo polia v zhilykh i proizvodstvennykh pomeshcheniakh i opredelenie putei ikh snizhenniya do bezopasnogo urovnia." *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyj vypusk "Problemy suchasnoi elektrotehniki.* 2 (2008): 3-8. Print. **2.** Serduk A.M., Grigoriev P.Ye., Akimenko V.Y., Protas S.V. "Ekolohichna znachushchist' heomahnitnogo polia ta medychno-biolohichni peredomyov hiihienichni rehlamentatsii ioho oslableniya v umovakh Ukrayiny." *Dovkilla i zdorovia.* 3 (2010): 8-11. Print. **3.** Standard of Building Biology Testing Methods: SBM-2008 [acting from July 2008]. Germany: Institut für Baubiologie + Ökologie IBN, 2008. 5 p. <<http://www.createhealthyhomes.com/SBM-2008.pdf>>. **4.** Rozov V.Yu., Reutskiy S.Yu., Levina S.V. "Issledovanie iavleniya oslableniya staticeskogo geomagnitnogo polia stal'noi kolonnoi." *Tekhnichna elektrodynamika.* 1 (2014): 12-19. Print. **5.** Rozov V.Yu., Pelevin D.Ye., Levina S.V. "Eksperimental'nye issledovaniia iavleniya oslableniya staticeskogo geomagnitnogo polia v pomeshcheniakh." *Elektrotehnika i elektromekhanika.* 6 (2013): 72-76. Print. **6.** Rozov V.Yu., Levina S.V. "Modelirovaniye staticeskogo geomagnitnogo polia vnutri pomeshchenii sovremennykh zhilykh domov." *Tekhnichna elektrodynamika.* 4 (2014): 8-10. Print. **7.** DBN B. 2.6698:2009. *Konstruktsii budynkiv i sporyd. Betonni ta zalizobetonni konstrukii. Osnovni polozhennia.* Kyiv, Minrechionbud Publ., 2011, 71. Print. **8.** DSTU 3760:2006. *Prokat armaturnyi dlja zalizobetonnykh konstrukcij. Zahalni tekhnichni umovy.* Kyiv, Derzhspozhyvstandart Ukrayiny Publ., 2007, 28. Print. **9.** Kuvaldin A.B. "Osobennosti rascheta parametrov elektromagnitnogo polia v ferromagnitnoi stali." *Promyshleyny elektroobogrev i elektrotopplenie.* 2 (2014): 26-30. Print. **10.** Berezhkov B.N., Arkhipov A.V. "Konstruktionsnye materialy. Chast' 1. Stali i splavy: Metod. ukazaniya." *Samara, Samar. gos. aerokosm. un-t,* 2001, 16. Print. **11.** Priima M.V., Shirshov L.S., Shcherbakov P.A. "Magnitnye kharakteristiki stali StZ pri temperature 4,2-300 K." *Serpukhov, Preprint IFVE 87-173,* 1987, 8. Print. **12.** Rozov V.Yu., Zavalnyi A.V., Zolotov S.M., Gretskykh S.V. "Metody normalizatsii staticeskogo geomagnitnogo polia v zhilykh domakh." *Elektrotehnika i elektromekhanika.* 2 (2015): 35-40. Print.

Поступила (received) 16.03.2015



Гречихина Светлана Владимировна, младший научный сотрудник ГУ "Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины" (ГУ "ИТПМ НАНУ"). Защищила диплом магистра по специальности "физика" в 2011 г. в Харьковском национальном университете имени В. Н. Каразина. В 2011-2014 гг. училась в аспирантуре при ГУ "ИТПМ НАНУ". С ноября 2014 г. является работником ГУ "ИТПМ НАНУ". Научные интересы связаны с исследованием статического магнитного поля и его влиянием на объекты.

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

УДК 621.039.624

В.Б. ЮФЕРОВ, д-р техн. наук, нач. отдела ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

В.В. КАТРЕЧКО, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

С.В. ШАРЫЙ, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

Т.И. ТКАЧЕВА, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

А.С. СВИЧКАРЬ, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

М.О. ШВЕЦ, инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

В.О. ИЛЬЧЕВА, вед. инженер-исследователь, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

РАСЧЁТ И МОДИФИКАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СЕПАРАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Приведены топографии и осевые распределения магнитного поля установки для магнитоплазменного разделения заряженных частиц по массам "ДИС-1" с учетом влияния магнитопроводов и собственного магнитного поля плазменного источника, а также усовершенствования конфигурации магнитной системы установки. Показано, что при одностороннем включении магнитных систем установки и плазменного источника в области ионизации создаётся магнитная пробка. Предложен вариант конструкции установки для магнитоплазменного разделения элементов ОЯТ.

Ключевые слова: отработанное ядерное топливо, магнитоплазменный метод, плотность плазмы, магнитная пробка, сепаратор.

Вступление и анализ последних достижений. В настоящее время актуальным вопросом является вопрос о переработке отработанного ядерного топлива (ОЯТ), поскольку атомные электростанции производят до 50% от всей электроэнергии в Украине, в результате чего ежегодно образуется более 300 т ОЯТ, которое отправляется на "вечное" хранение. При этом в нём остаётся большое количество неиспользованного топлива. Существующие методы переработки ОЯТ являются либо малопроизводительными и энергозатратными (электромагнитный метод), либо увеличивают количество радиоактивных отходов (радиохимический метод), либо не до конца отработаны (газофторидная технология). Исключить данные недостатки может магнитоплазменный (МП) метод переработки ОЯТ [1]. МП метод основан на отделении ядерного топлива от продуктов деления, в плазме, вращающейся в скрещенных ExB полях. Этот метод не приводит к увеличению количества радиоактивных отходов, несущих 90% радиоактивности.

© В.Б. Юферов, В.В. Катречко, С.В. Шарый, Т.И. Ткачева, А.С. Свичкарь, М.О. Швец, В.О. Ильчева, 2015

Цель статьи – исследовать вклад магнитного поля плазменного источника на общее распределение магнитного поля установки "ДИС-1" и предложить возможную конструкцию установки для разделения ОЯТ.

Экспериментальная установка. В ННЦ ХФТИ исследуются физические принципы МП метода переработки ОЯТ [2-5]. Поскольку работа с радиоактивными элементами ОЯТ является вредной, затратной и требующей специального разрешения, проводятся эксперименты с плазмой имитационных сред. В данном случае речь идёт о группе элементов имитирующих элементы ОЯТ по массе. Ранее в работе [6] были проведены эксперименты со смесью инертных газов (Xe , Kr , Ar). Схематический вид установки ДИС-1 приведен на рис.1. Полученные результаты указывают на возможность разделения элементов по массам во вращающейся в ExB полях плазме.

Конфигурация магнитного поля установки ДИС-1 подобрана таким образом, что области создания плазмы (ПИ) и разделения сепарируемых ионов разнесены. Таким образом, имеется три области магнитного поля: область создания плазмы, область дрейфа и область разделения. В первой области для увеличения степени ионизации плазма должна быть достаточно плотной, а в области разделения – бесстолкновительной, что существенно для эффективного разделения и производительности.

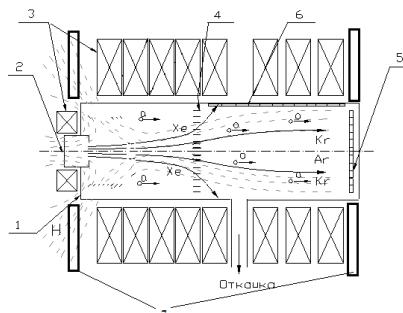


Рис. 1 – Схематический вид установки ДИС-1: 1 – вакуумная камера ($D = 0.38$ м, $L = 1.66$ м); 2 – плазменный источник с собственной катушкой (эквивалентный ток 2.4 А); 3 – магнитная система установки; 4 – коаксиальная система электродов радиального электрического поля; 5 и 6 – торцевой и продольный коллекторы; 7 – магнитопроводы установки

Для удобства диагностики и упрощения интерпретации экспериментальных данных проведена корректировка распределения напряженности магнитного поля выбором расположения соленоидов. Корректировка привела к увеличению протяженности и однородности области разделения. На рис. 2 приведены расчетные топографии и осевые распределения напряженностей магнитного поля установки

"ДИС-1" после корректировки учитывающие влияние магнитопроводов и магнитного поля плазменного источника. Область однородного магнитного поля увеличилась до 30 сантиметров(от 90 до 120 см вдоль длины установки $\delta H < 2\%$).

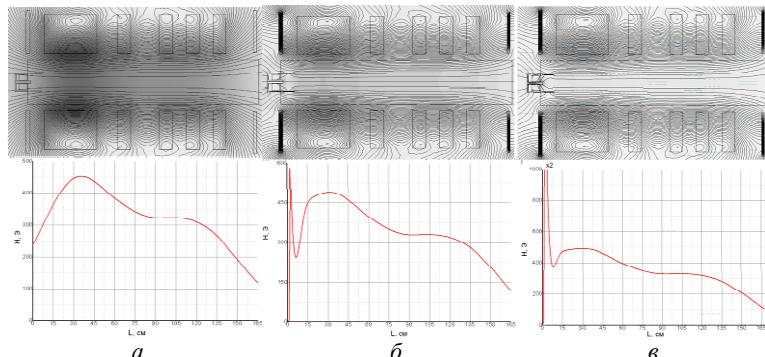


Рис. 2 – Топография и продольное осевое распределение магнитного поля установки ДИС-1 ($I=200$ А): а – без учета магнитопроводов и собственного магнитного поля ПИ, б – с учетом магнитопроводов ПИ, в – с учётом магнитопроводов и при однонаправленном включении магнитных систем установки ДИС-1 и ПИ

Как видно, магнитопроводы и магнитное поле плазменного источника приводят к образованию магнитной пробки в области создания плазмы. Наличие магнитной пробки приводит к увеличению осцилляций электронов и повышению степени ионизации. В случае когда ток в катушке плазменного источника 4,8 А, а ток магнитной системы установки 200А, пробочное отношение составляет 6.

Изменение системы питания соленоидов установки из однофазной на трёхфазную позволило снизить пульсации напряжения до величины $dV = 0,2$ В (см. рис. 3).

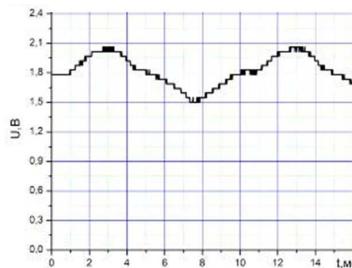


Рис. 3 – Осциллограмма напряжения подводимого к соленоидам, создающим продольное магнитное поле установки ДИС-1

Направление дальнейших исследований. В имитационных экспериментах используются магнитные поля на уровне 0.1-0.2 Тл, а для разделения отработанного ядерного топлива в области ионизации необходимо магнитное поле около 3 Тл. Для получения таких магнитных полей предлагается использовать сверхпроводящие соленоиды, охлаждаемые жидким гелием.

К тому же применительно к ОЯТ конструкция разделительной установки должна иметь другие геометрические размеры. Исключить нежелательный поток паров ОЯТ на стенки установки возможно при плотностях около $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и толщине плазмы $\sim 10\ldots 15 \text{ см}$. В этом случае степень ионизации близка к 1. В то же время на участке радиального выхода резонансных ионов плазма должна быть бесстолкновительной, поэтому в этой области плотность плазмы может быть на уровне $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Для того чтобы выполнялось условие непрерывности потока плазмы, сечение плазмы в области плазменного источника и в области разделения должны различаться в $\sim 10^3$ раз, исходя из соотношения необходимых плотностей плазмы в этих областях. То есть радиус камеры в области разделения должен быть увеличен примерно в 30 раз, по сравнению с выходным отверстием плазменного источника. С учетом таких особенностей конструкция установки для разделения ОЯТ может иметь вид, приведенный на рис. 4.

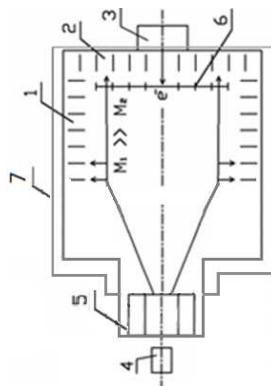


Рис. 4 – Схема МП сепаратора для ОЯТ: 1 – вакуумная камера и продольные коллекторы, 2 – торцевые коллекторы, 3 – электронная пушка, 4 – приемник пучка-испарителя ТВЭЛов, 5 – магнитная система ПИ с полем около 3 Тл, 6 – система радиального электрического поля, 7 – магнитное поле сепаратора величиной $\approx 0.1 \text{ Тл}$

Установку предлагается расположить вертикально в связи с использованием жидкостного катода. Топография и распределение магнитного поля установки для разделения элементов ОЯТ по массам приведены на рис. 5 и 6.

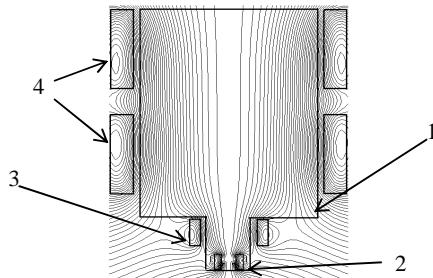


Рис. 5 – Топография установки МП сепаратора для ОЯТ: 1 – вакуумная камера, 2 – катушка плазменного источника, 3 – магнитная система области ионизации, 4 – магнитная система области сепарации

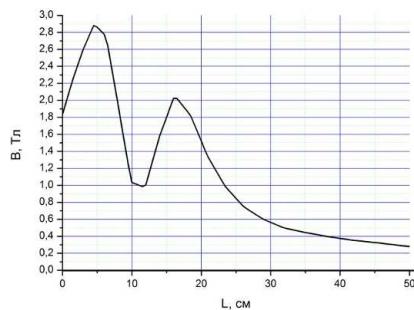


Рис. 6 – График осевого распределение индукции магнитного поля в камере МП сепаратора для ОЯТ

Тяжелые ионы должны выходить на стенку на соответствующий коллектор, откуда в последующем будут осыпаться и изыматься в нижней части установки, а легкие – двигаться вдоль силовых линий магнитного поля к торцу камеры.

Выводы. Рассмотрено влияние магнитной системы а также магнитопроводов и магнитного поля плазменного источника на общее распределение магнитного поля установки "ДИС-1". Показано, что магнитопроводы и магнитное поле плазменного источника приводят к образованию магнитной пробки в области создания плазмы, которая повысит степень ионизации за счёт увеличения осцилляции электронов. Изменение конфигурации магнитной системы установки позволило увеличить область однородного магнитного поля до ≈ 30 см, а изменение системы питания соленоидов установки с однофазной на трёхфазную снизить пульсации напряжения, $dV = 1.2$ В (16%). Предложен вариант конструкции МП сепаратора для разделения ОЯТ. Установка имеет вертикальное расположение. Магнитное поле плазменного источника создаётся сверхпроводящим соленоидом, охлаждаемым жидким гелием.

Список літератури: 1. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый и др. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №55. – С.129-149. 2. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, В.О. Ільїчева Плазменная сепарация ОЯТ – один из возможных путей решения проблемы замкнутого ядерного топливного цикла // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (101). – 2013. – №2(84). – С.148-151. 3. Патент на винахід №103696 "Пристрій для розділення заряджених частинок за масою" // О.М. Єгоров, В.Б. Юферов, С.В. Шарий та ін., власник ННЦ "ХФІ", 11.11.2013. 4. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый и др. О некоторых особенностях сепарационных устройств с вращающейся плазмой в скрещенных электрическом и магнитном полях // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – №60. – С.103-116. 5. А.М. Егоров, В.Б. Юферов, С.В. Шарый и др. Экспериментальная электромагнитная плазменная установка ДИС-1 для имитационного разделения отработанного ядерного топлива. Предварительные результаты // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний вип.: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №41. – С.78-90. 6. А.М. Yegorov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy, V.A. Seroshtanov, O.S. Druy, V.V. Yegorenkov, E.V. Ribas, S.N. Khizhnyak, D.V. Vinnikov. Preliminary study of the demo plasma separator // PAST №1, Ser.: "Plasma Physics" (59), 2009, pp.122-124 7. В.Б. Юферов, А.С. Свічкарь, С.В. Шарый, В.В. Катречко, Т.І. Ткачєва// DYNAMICS ION FLOWS IN A ROTATING PLASMA East Eur. J. Phys. Vol.1 No.2 (2014), P 96-99.

Bibliografiy (transliterated): 1. V.B. Juferov, A.M. Egorov, S.V. Sharyj i dr. "Magnitoplazmennaja regeneracija OJaT". Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu "Kharkivskyi politekhnichnyi instytut". Zb. nauk. prats. Tematichnyi vyp.: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. 55 (2010): 129-149. Print. 2. V.B. Juferov, A.M. Egorov, V.O. Il'icheva "Plazmennaja separacija OJaT – odin iz vozmozhnyh putej reshenija problemy zamknutogo jadernogo toplivnogo cikla". Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: Fizika radiacionnyh povrezhdenij i radiacionnoe materialovedenie. 2 (84) (2013): 148-151. Print. 3. Pat. 103696 UA Prystrii dlia rozdilennia zariadzhenykh chastynok za masoju. O.M. Yehorov, V.B. Yuferov, S.V. Sharyi ta in., vlasnyk NNTs "KhFTI", 11.11.2013. 4. V.B. Yuferov, A.M. Egorov, S.V. Sharyi y dr. "O nekotorykh osobennostyakh separatsyonnykh ustroistv s vrashchajushcheisja plazmoi v skreshchennykh elektrycheskom y mahnytnom poliakh". Visnyk Natsionalnoho tekhnichnogo universytetu "Kharkivskyi politekhnichnyi instytut". Zb. nauk. prats. Tematichnyi vyp.: Problemy udoskonalennia elektrychnykh mashyn i aparativ. 60 (2011): 103-116. Print. 5. А.М. Егоров, В.В. Юферов, С.В. Шарий и др. "Jeksperimental'naja jelektromagnitnaja plazmennaja ustanovka DIS-1 dlja imitacionnogo razdelenija otrabotannogo jadernogo topliva. Predvaritel'nye rezul'taty". Visnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu "Harkiv's'kij politekhnichnij institut". Zb. nauk. prac'. Tematichnij vyp.: Problemi udoskonalennja elektrichnih mashin i aparativ. 41 (2009): 78-90. Print. 6. А.М. Егоров, В.В. Юферов, С.В. Шарий, В.А. Серощанов, О.С. Друй, В.В. Егоренков, Е.В. Рібас, С.Н. Хіжніак, Д.В. Вінніков. "Preliminary study of the demo plasma separator" PAST №1, Ser.: "Plasma Physics". 59 (2009): 122-124. Print. 7. V.B. Juferov, A.S. Svičkar', S.V. Sharyj, V.V. Katrėčko, T.I. Tkach'ova "Dynamics ion flows in a rotating plasma" East Eur. J. Phys. Vol 1, No 2 (2014): 96-99. Print.

Поступила (received) 26.12.2014



Юферов Владимир Борисович, профессор, доктор технических наук, начальник отдела, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", yufarov@kipt.kharkov.ua. Зашел диплом инженера по специальности физика на физико-математическом факультете ХГУ, диссертацию кандидата и доктора физико-математических наук по специальности экспериментальная физика, соответственно в 1967 и 1977 гг. Научные интересы: проблемы использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики, исследования в области атомной науки и техники.



Катречко Вячеслав Викторович, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил НТУ "ХПИ" в 2013 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений". Научные интересы: физика плазмы, физические методы разделения многокомпонентных смесей.



Шарый Сергей Владимирович, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Зашел диплом инженера-физика по специальности "Защитные покрытия и материалы реакторостроения" на физико-техническом факультете ХГУ в 1995г. Научные интересы: физика плазмы, сепарация вещества на изотопы из плазменного состояния.



Ткачева Татьяна Ивановна, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончила НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений". Научные интересы: физика плазмы, зондовые методы диагностики плазмы.



Свичкарь Александр Сергеевич, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений". Научные интересы: физика плазмы, диагностика плазмы при помощи зондовых измерений.



Швец Михаил Олегович, инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил ХГУ 1988г., по специальности экспериментальная ядерная физика. Научные интересы связаны с методами сепарации вещества по изотопам из плазменного состояния.



Ильичева Вера Олеговна, ведущий инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", i-vera@yandex.ru. Окончила ХИРЭ по специальности "Прикладная математика" в 1982г. Научные интересы: математическое моделирование физических процессов, разработка магнитных систем.

В.Б. ЮФЕРОВ, д-р техн. наук, нач. отдела ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
Т.И. ТКАЧЕВА, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
С.В. ШАРЫЙ, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
А.С. СВИЧКАРЬ, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
В.В. КАТРЕЧКО, м.н.с., ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков
В.О. ИЛЬИЧЕВА, вед. инженер-исследователь, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", Харьков

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ

Приведены результаты расчета движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях в одночастичном приближении. Учтены параметры магнитного и электрического полей установки по разделению заряженных частиц (магнитоплазменного сепаратора). В качестве заряженных частиц рассматривались однозарядные ионы Ar, Kr и Xe. Изменяемые в расчетах параметры учитывают разброс ряда начальных условий в проводимых экспериментах.

Ключевые слова: сепаратор, плотность плазмы, ион, дрейф, система уравнений, траектория движения.

Вступление. В работах [1, 2] рассматриваются физические принципы магнитоплазменного метода разделения групп масс, где разделение происходит в плазме, вращающейся в скрещенных электрическом и магнитном полях. Вращение происходит за счет дрейфа заряженных частиц в продольном магнитном и радиальном электрическом полях. При этом происходит еще и циклотронное вращение заряженной частицы в магнитном поле. В такой системе возможно разделение заряженных частиц по массам [3-5].

В области разделения групп масс плазма считается бесстолкновительной, поэтому в расчетах рассматривается движение отдельных заряженных частиц без учета коллективных явлений, то есть в одночастичном приближении.

Цель статьи – исследовать движение заряженных частиц в установке для магнитоплазменной сепарации при изменении различных параметров.

Постановка математической модели. В электромагнитном поле на заряженную частицу действуют сила со стороны электрического поля и сила со стороны магнитного поля:

©В.Б. Юферов, Т.И. Ткачева, С.В. Шарый, А.С. Свичкарь, В.В. Катречко, В.О. Ильичева, 2015

$$m\vec{a} = q\vec{E} + q[\vec{V}, \vec{B}].$$

В цилиндрической системе координат движение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях описывается системой из следующих уравнений [4]:

$$\begin{aligned} m(\ddot{r} - r\dot{\phi}^2) &= q(E_r + r\dot{\phi}B_z - \dot{z}B_\phi); \\ m(2r\dot{\phi} + \dot{r}\ddot{\phi}) &= q(E_\phi + \dot{z}B_r - \dot{r}B_z); \\ m\ddot{z} &= q(E_z + \dot{r}B_\phi - r\dot{\phi}B_r). \end{aligned}$$

Система уравнений решалась при заданных начальных условиях: $r(0) = r_0$, $\phi(0) = \phi_0$, $z(0) = z_0$; $\dot{r}(0) = V_{r0}$, $\dot{\phi}(0) = 0$, $\dot{z}(0) = V_{z0}$, где r_0 , ϕ_0 и z_0 – начальные координаты заряженной частицы, V_{r0} и V_{z0} – компоненты начальной скорости. Компоненты V_{r0} и V_{z0} заданы в виде: $V_{r0} = V_0 \sin \alpha$, $V_{z0} = V_0 \cos \alpha$, где V_0 – начальная скорость, α – угол, под которым частица попадает в систему.

Магнитное поле имеет две отличные от нуля компоненты: B_r и B_z . Продольное магнитное поле B_z (рис. 1) имеет три линейных участка (нарастание 0 до B_0 на участке от 0 до L , спад от B_0 до $0.4B_0$ на участке от L до $4L$ и участок однородного магнитного поля с индукцией $0.4B_0$ на $z > 4L$). В расчетах учтено, что в реальных условиях в распределении магнитного поля не существует точек перегиба.

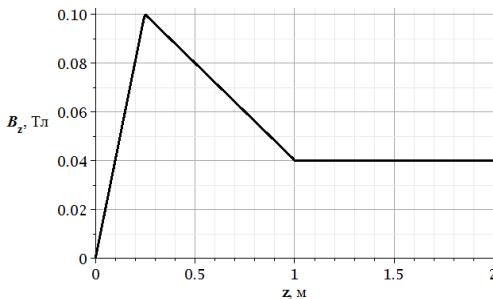


Рис. 1 – Продольное магнитное поле

С целью упрощения расчетов был выбран именно такой способ задания продольного магнитного поля, который принципиально повторяет реальную конфигурацию магнитного поля установки [6]: нарастание, спад и участок однородного поля. Поскольку на данном этапе нас интересует только область дрейфа частиц вдоль силовых

линий спадающего магнитного поля и область однородного поля, то в расчетах учитывались два участка: спад и участок $B_z = \text{const}$.

Радиальная компонента магнитного поля B_r связана с продольной B_z соотношением $\text{div}B=0$. С учетом этого компоненты магнитного поля имеют следующий вид:

$$B_r = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ -\frac{rB_0}{2L}, & 0 \leq z \leq L, \\ \frac{rB_0}{10L}, & L < z < 4L, \\ 0, & z \geq 4L; \end{cases}$$

$$B_\varphi = 0;$$

$$B_z = \begin{cases} 0, & z < 0, \\ \frac{B_0 z}{L}, & 0 \leq z \leq L, \\ \frac{B_0(6L-z)}{5L}, & L < z < 4L, \\ 0.4B_0, & z \geq 4L. \end{cases}$$

Исходя из размеров установки для магнитоплазменной сепарации и условий проведения экспериментов [6], приняты следующие значения величин: $L = 0,25$ м; максимальное значение индукции магнитного поля $B_0 = 0,1$ Тл находится на длине $z = 0,25$ м. Участок однородного магнитного поля с индукцией $0,4B_0$ ($0,04$ Тл) начинается с $z = 1$ м; напряженность электрического поля имеет только одну ненулевую компоненту и одинакова по всей длине системы ($E_r = E_0$, $E_\varphi = 0$, $E_z = 0$).

Поскольку при проведении экспериментов заряженные частицы имеют некоторый разброс начальных условий (выходят из источника с разными энергиями, имеют различные начальные координаты и направления движения), в поставленной задаче исследовалось влияние следующих параметров на траектории движения частиц: значения E_0 , m , φ_0 , V_0 и a .

Результаты расчетов и их анализ. На рис. 2 (а, б, в) показаны траектории движения заряженной частицы при различных значениях напряженности электрического поля. Выбранные значения напряженности электрического поля соответствуют реальным условиям проводимых экспериментов [6].

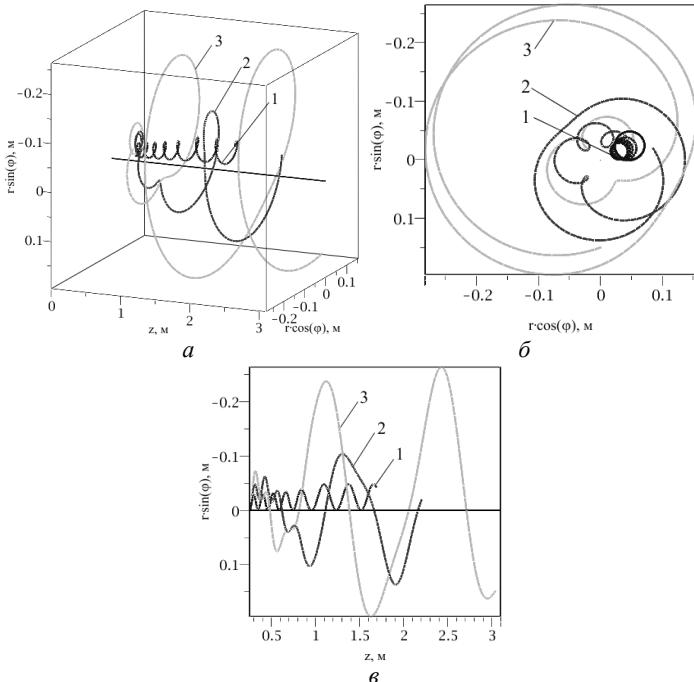


Рис. 2 – Траектории движения однозарядного аргона с начальной энергией 5 эВ, $r_0=3$ см, $z_0=25$ см: 1 – $E_r = 0$, 2 – $E_r = 100$ В/м, 3 – $E_r = 200$ В/м

Когда электрическое поле отсутствует, траектория движения иона определяется только магнитной компонентой силы Лоренца, и заряженная частица вращается по окружностям разного радиуса в зависимости от величины магнитного поля. Когда на заряженную частицу действует отличное от нуля радиальное электрическое поле, то происходит дрейф этой частицы в направлении, перпендикулярном электрическому и магнитному полю, то есть вращение ведущего центра частицы. Из рис. 2, *б* видно, что при большем значении E_r (200 В/м) заряженная частица движется по траектории с большим радиусом по сравнению со случаем $E_r = 100$ В/м. Также очевидно, что при значении $E_r = 200$ В/м частица имеет большую энергию по сравнению со случаем $E_r = 100$ В/м, а следовательно, движется с большей скоростью и перемещается по оси z на большее расстояние, что и подтверждается рис. 2, *в*. Это происходит потому, что величина напряженности электрического поля входит в силу Лоренца, и при

увеличении E_r увеличивается и сила, действующая на заряженную частицу. Поскольку имеет место наложение циклотронного вращения заряженной частицы на вращение ведущего центра за счет дрейфа в скрещенных полях, то возможны почти прямолинейные участки (кривая 2, рис. 2) в случае, если вращение ведущего центра представляет собой окружность малого радиуса в то время, как циклотронное вращение происходит по окружности большого радиуса.

На рис. 3 (а, б, в) показаны траектории движения заряженных частиц, различающихся по массе: однозарядные ионы Ar, Kr и Xe с массами 40 а.е.м., 84 а.е.м. и 131 а.е.м. соответственно.

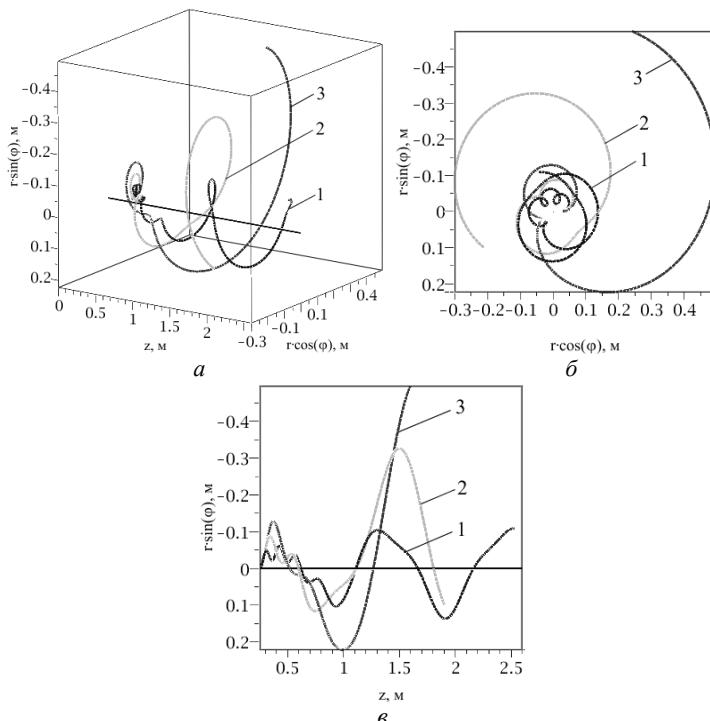


Рис. 3 – Траектории движения однозарядных частиц с начальной энергией 5 эВ в электрическом поле с $E_r = 100$ В/м, $r_0=3$ см, $z_0=25$ см: 1 – Ar, 2 – Kr, 3 – Xe

Такой состав элементов по соотношению 1:2:3 имитировал состав ОЯТ при проведении экспериментов [7]. Из приведенных графиков видно, что масса частицы существенно влияет траекторию движения: чем больше масса, тем частица быстрее "раскручивается" и движется

по траектории с большим радиусом. Однако через один и тот же промежуток времени легкая частица переместится по оси z дальше по сравнению с тяжелой частицей, так как значение массы входит в величину продольной скорости (рис. 3, в).

На рис. 4 (а, б, в) показаны траектории движения заряженной частицы с различными начальными энергиями $W_0 = mV_0^2 / 2$. Поскольку W_0 квадратично зависит от V_0 , то изменение начальной энергии не оказывает столь значительного влияния на траекторию иона, как напряженность электрического поля и масса частицы.

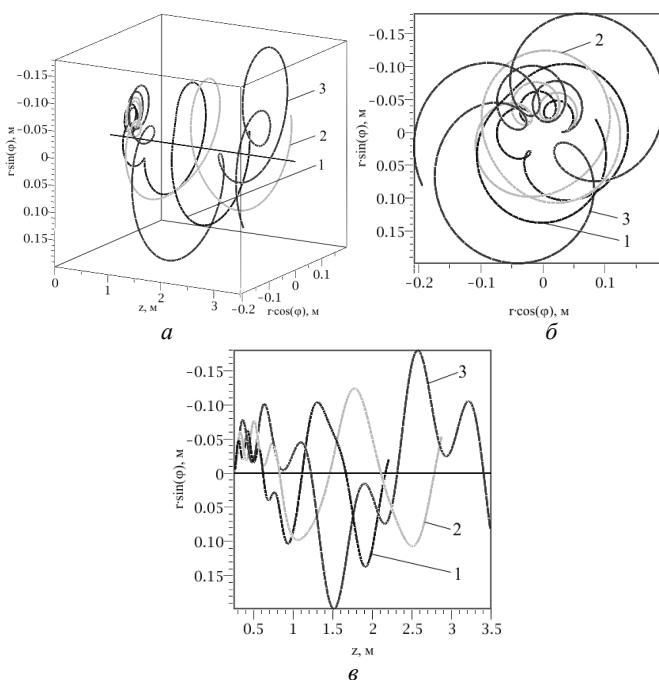


Рис. 4 – Траектории движения однозарядного аргона в электрическом поле с $E_r = 100$ В/м, $r_0=3$ см, $z_0=25$ см: 1 – $W_0=5$ эВ, 2 – $W_0=10$ эВ, 3 – $W_0=20$ эВ

На рис. 5 (а, б, в, г) показаны траектории движения заряженных частиц, которые начинают свое движение из 4-х различных начальных положений (изменялось значение ϕ_0). Видно, что траектория иона не изменяется в зависимости от значения ϕ_0 , траектории во всех случаях одинаковые, только смещенные на угол 90 градусов.

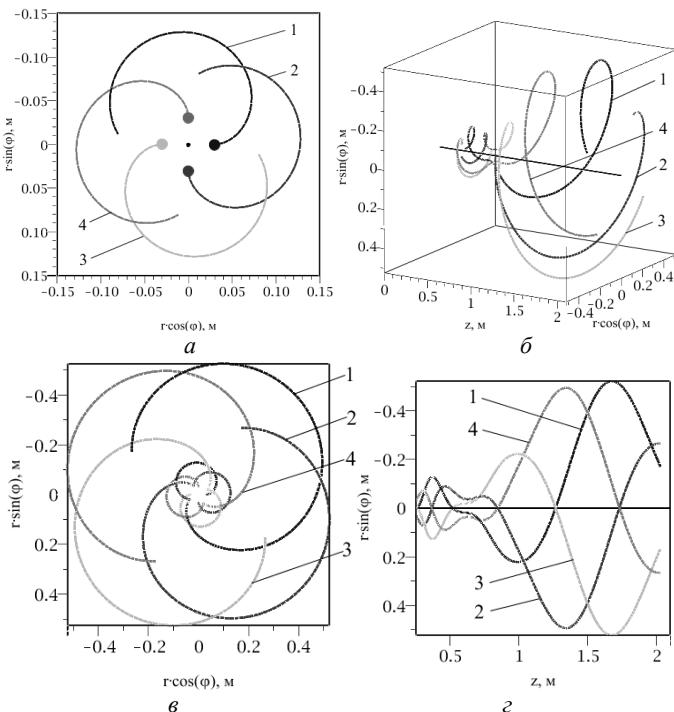


Рис. 5 – Траектории движения однозарядного ксенона с начальной энергией 5 эВ в электрическом поле с $E_r = 100$ В/м, $r_0=3$ см, $z_0=25$ см:
 $1 - \varphi_0 = 0$, $2 - \varphi_0 = 90^\circ$, $3 - \varphi_0 = 180^\circ$, $4 - \varphi_0 = 270^\circ$

На рис. 6 (*a*, *б*, *в*, *г*) показаны траектории движения заряженных частиц, начинающих свое движение под разными углами α к оси z : 30° , 60° , -30° , -60° . На рис. 6 (*д*, *е*) представлены компоненты начальной скорости в случае положительного и отрицательного углов. Видно, что при положительных углах (кривые 3 и 4) характер движения частиц существенно не изменяется, в то время, как при отрицательных углах (кривые 1 и 2) частица вначале двигается в противоположную сторону согласно заданным углам (то есть к центру системы), а затем поворачивается и продолжает двигаться так, как частицы, начинающие свое движение под положительными углами.

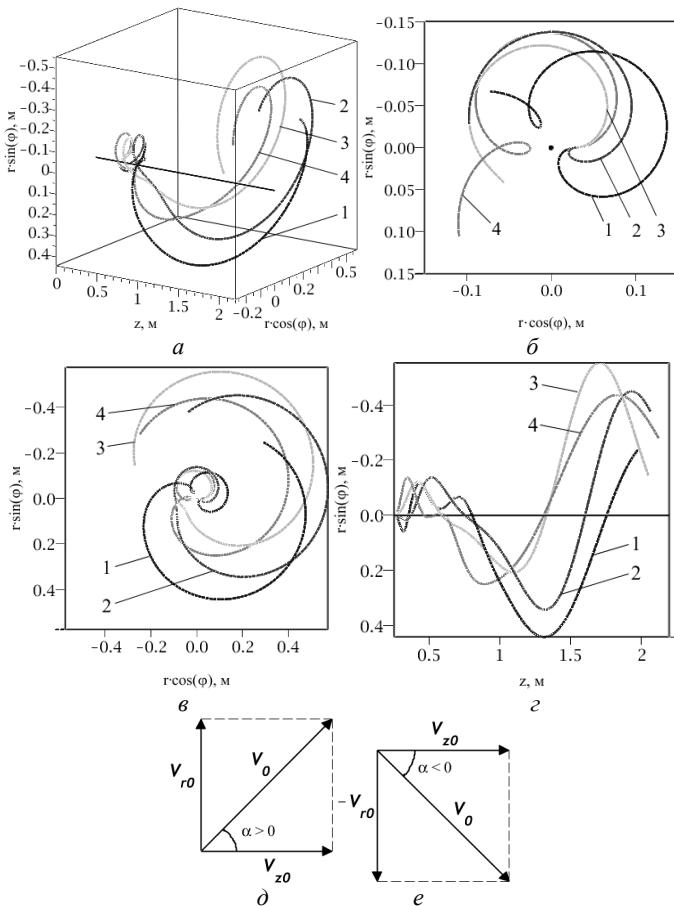


Рис. 6 – Траектории движения (а, б, в, г) однозарядного ксенона с начальной энергией 5 эВ в электрическом поле с $E_r = 100$ В/м, $r_0=3$ см, $z_0=25$ см:
 1 – $\alpha = -60^\circ$, 2 – $\alpha = -30^\circ$, 3 – $\alpha = 30^\circ$, 4 – $\alpha = 60^\circ$ и компоненты начальной скорости ($\partial - \alpha > 0$, $e - \alpha < 0$)

Так происходит потому, что ни направление электрического поля, ни направление магнитного поля не меняются, и вращение заряженной частицы в магнитном поле совместно с дрейфом в электрическом и магнитном полях происходит в одну и ту же сторону.

Выводы. В условиях бесстолкновительной плазмы рассчитаны и построены траектории движения заряженных частиц при изменении различных параметров: величины напряженности электрического

поля, массы частицы, начальной энергии, пространственного положения начала движения ионов, угла в начальный момент времени. Частицы в реальных условиях выходят из источника с разными энергиями, имеют различные начальные координаты и направления движения, что и учтено в приведенных расчетах. Показано, что на характер движения заряженных частиц существенно влияет наличие электрического поля и масса частицы, а энергия, угол и пространственное положение в начальный момент времени принципиально не изменяют траекторию движения иона. Если ограничить области расчетов размерами вакуумной камеры, то видно, что тяжелые частицы будут выходить на цилиндрическую поверхность камеры, а более легкие частицы будут оставаться внутри камеры и двигаться к ее торцу, не достигая стенок, что и приведет к разделению частиц по массам.

Список литературы: 1. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый и др. Магнитоплазменная регенерация ОЯТ // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №55. – С.129-149. 2. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый и др. О некоторых особенностях сепарационных устройств с вращающейся плазмой в скрещенных электрическом и магнитном полях // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – №60. – С.103-116. 3. Г.М. Фихтенгольц Курс дифференциального и интегрального исчисления. В 3 т. Т. I / Пред. и прим. А.А. Флоринского. – 8-е изд. – М.: ФИЗМАТЛІТ. – 2003. – 680 с. 4. Н. Кролл, А. Трайвелліс Основы физики плазмы. – Москва: "Наука" – 1975. – 515 с. 5. И.Н. Онищенко О механизме сепарации ионов плазмы, инжектируемой в скрещенные ExH поля // Вопросы атомной науки и техники. Серия: "Ядерно-физические исследования". – 2012. – №4(80). – С.108-111. 6. А.М. Егоров, В.Б. Юферов, С.В. Шарый и др. Экспериментальная электромагнитная плазменная установка ДІС-1 для имитационного разделения отработанного ядерного топлива. Предварительные результаты // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №41. – С.78-90. 7. В.Б. Юферов, А.М. Егоров, С.В. Шарый и др. О сепарационных свойствах устройств с вращающейся плазмой в скрещенных электрическом и магнитном полях // Вопросы атомной науки и техники. Серия: "Ядерно-физические исследования". – 2012. – №3(79). – С.96-100.

Bibliography (transliterated): 1. V.B. Yuferov, A.M. Yegorov, S.V. Shariy etc. "Magneto plasma reprocessing of SNF". *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*. 55 (2010): 129-149. Print. 2. V.B. Yuferov, A.M. Yegorov, S.V. Shariy etc. "About some features of separation devices with rotating plasma in crossed electric and magnetic fields". *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*. 60 (2011): 103-116. Print. 3. G.M. Fichtengol'c *Kurs differencial'nogo i integral'nogo ischislenija*. Moscow: FIZMATLIT. 2003. Print. 4. N. Kroll, A. Trajvelpis *Fundamentals of Plasma Physics*. Moscow: "Science". 1975. Print. 5. I.N. Onishchenko "To the mechanism of ion separation in plasma injected in crossed ExH fields". *Problems of atomic science and technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 4 (80) (2012): 108-111. Print. 6. A.M. Yegorov, V.B. Yuferov, S.V. Shariy etc. "The experimental plasma electromagnetic

installation DIS-1 for simulation of spent nuclear fuel partition. Preliminary results." *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*. 41 (2009): 78-90. Print. 7. V.B. Yuferov, A.M. Yegorov, S.V. Shariy etc. "On separation behavior of the devices with rotating plasma in crossed electric and magnetic fields". *Problems of atomic science and technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 3 (79) (2012): 96-100. Print.

Поступила (received) 26.12.2014



Юферов Владимир Борисович, профессор, доктор технических наук, начальник отдела, ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", yuferov@kipt.kharkov.ua. Защитил диплом инженера по специальности физика на физико-математическом факультете ХГУ, диссертацию кандидата и доктора физико-математических наук по специальности экспериментальная физика, соответственно в 1967 и 1977 гг.

Научные интересы: проблемы использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики, исследования в области атомной науки и техники.



Ткачева Татьяна Ивановна, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончила НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений".

Научные интересы: физика плазмы, зондовые методы диагностики плазмы.



Шарый Сергей Владимирович, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ". Защитил диплом инженера-физика по специальности "Захитные покрытия и материалы реакторостроения" на физико-техническом факультете ХГУ в 1995г.

Научные интересы: физика плазмы, сепарация вещества на изотопы из плазменного состояния.



Свичкарь Александр Сергеевич, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил НТУ "ХПИ" в 2010 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений".

Научные интересы: физика плазмы, диагностика плазмы при помощи зондовых измерений.



Катречко Вячеслав Викторович, младший научный сотрудник ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", окончил НТУ "ХПИ" в 2013 г. по специальности "Техника и электрофизика высоких напряжений".

Научные интересы: физика плазмы, физические методы разделения многокомпонентных смесей.



Ильичева Вера Олеговна, ведущий инженер-исследователь ИПЭНМУ ННЦ "ХФТИ", i-vera@yandex.ru. Окончила ХИРЭ по специальности "Прикладная математика" в 1982г.

Научные интересы: математическое моделирование физических процессов, разработка магнитных систем.

В.И. ГРИЦЮК, канд. техн. наук, доц., ХНУРЭ, Харьков

**МОДИФИЦИРОВАННЫЕ РОБАСТНЫЕ ГРЕБНЕВЫЕ
ОЦЕНКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБРОСОВ**

Оценки наименьших квадратов (LSE), в множественной линейной регрессии, когда предсказатели сильно коррелированы, дают низкую точность предсказания. Гребневая регрессия, являясь регуляризованной версией регрессии на основе метода наименьших квадратов, основываясь на минимизации квадратичной функции потерь, чувствительна к выбросам. Рассмотрены сглажено сниженные ψ -функции, которые приводят к асимптотически эффективным оценкам. Для получения результирующих робастных гребневых оценок для выявления выбросов используется метод итеративно ревзвешенных наименьших квадратов (IRLS) на основе рассмотренной ψ -функции. Результаты моделирования подтверждают полученные теоретические выводы. Получена сходимость к итоговым оценкам коэффициентов с меньшим количеством итераций, чем без применения гребневой регрессии. Объединенные робастные и гребневые оценки позволяют получить стабильные коэффициенты и остатки, которые помогают определить истинные коэффициенты и выбросы.

Ключевые слова: М-оценки, робастные гребневые оценки.

Актуальность работы. В статье предлагается робастная и гребневая регрессия для одновременного решения проблемы мультиколлинеарности и определения выбросов в классической линейной регрессионной модели.

Когда предикторные переменные мультиколлинеарны, оценки наименьших квадратов могут быть слишком большими по абсолютной величине и дисперсии могут стать очень большими.

В множественной линейной регрессии, когда предсказатели тесно связаны, оценки наименьших квадратов (LSE) дают неточные прогнозы. Чтобы это исправить, Hoerl и Kennard предложили гребневую регрессию [1]. Они добавили штраф, который создаёт небольшое смещение для того, чтобы одновременно уменьшить оценку и уменьшить дисперсию, что приводит к повышению общей точности прогнозирования. Проблемы регрессии состоят как в мультиколлинеарности так и ненормальности в той или иной степени. Холланд изучал совокупную проблему, и предложил использовать взвешенную гребневую регрессию с робастным выбором весов. В данной работе представлен подход, основанный на сочетании математических формулировок программирования гребневой и

© В.И. Грицюк, 2015

робастной регрессии. Искомые коэффициенты регрессии могут быть легко вычислены путем итеративной ревзвешенной процедуры наименьших квадратов, примененной к расширенному набору данных. В результате робастные и гребневые оценки часто являются наилучшими оценками по сравнению с только либо робастными либо гребневыми оценками.

Целью настоящей работы является исследование и разработка объединённых методов робастного и гребневого оценивания, обладающих улучшенными свойствами сходимости и асимптотической эффективностью.

Методы робастного оценивания. Известно, что метод МНК ведет себя плохо, когда распределение ошибок не является нормальным, особенно, когда ошибки являются тяжелыми хвостами, то есть, если существуют отдаленные наблюдения. Эта чувствительность МНК к выбросам результатов приводит к очень обманчивым результатам. Чтобы справиться с этой проблемой была разработана методика робастной регрессии. Наиболее распространенным является метод робастной регрессии М-оценки, введенный Хубером [2, 3]. Наиболее часто используемыми робастными оценками являются Хьюбера М-оценки (Хампель и др., 1986), MM-оценки (Йохай, 1987), GM-оценки, Сигеля оценки повторяющихся медиан (Rousseeuw и Leroy 1987), оценки наименьших квадратов медиан (LMS), LTS-оценки, (Rousseeuw 1984), S-оценки (Rousseeuw и Yohai 1984), MVE-оценки (Rousseeuw и Leroy 1987), и оценивание минимального определителя ковариационной матрицы (MCD) (Rousseeuw и Van Driessen 1998). В настоящем исследовании вводится новое семейство асимптотически эффективных, сглаженно сниженных М-оценок.

М-оценивание основано на идее замены квадратов остатков, используемых в оценке МНК, другой функцией остатков,

$$\min_{\hat{\theta}} \sum_{i=1}^n \rho(r_i), \quad (1)$$

где ρ является симметричной функцией с минимумом в нуле, при этом, ρ -функция должна обладать следующими свойствами:

- 1) $\rho(0) = 0$,
- 2) $\rho(t) \geq 0$,
- 3) $\rho(t) = \rho(-t)$,
- 4) $\rho(t_1) \leq \rho(t_2)$ для $0 < t_1 < t_2$,
- 5) ρ непрерывная,

Дифференцируя уравнение (1) по отношению к коэффициентам регрессии, получаем

$$\sum_{i=1}^n \psi(r_i) x_{ij} = 0, j = 1, 2, \dots, p, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \psi(r_i / \hat{\sigma}) x_{ij} = 0, j = 1, 2, \dots, p, \quad (3)$$

где ψ является производной от ρ , x_i является вектором строкой объясняющих переменных i -го наблюдения. М-оценка получается путем решения системы ' p ' нелинейных уравнений. Решение не эквивариантно относительно масштабирования. Таким образом, остатки должны быть стандартизированы с помощью некоторой оценки стандартного отклонения σ , так что, они должны быть оценены одновременно. Одна возможность состоит в использовании медианы абсолютных отклонений (MAD). Шкала оценки: $\hat{\sigma} = 1.483 \text{med}_i |r_i|$. Умножение на 1,483 сделано так, что для нормально распределенных данных $\hat{\sigma}$ является оценкой стандартного отклонения. Соответствующая W-функция (весовая функция) для любого ρ затем определяется как

$$\omega(t_i) = \frac{\psi(t_i)}{t_i}, \quad (4)$$

где t_i стандартизованные остатки. Используя эти W-функции в МНК, мы получаем взвешенный метод наименьших квадратов (WLS) и полученные оценки называются взвешенными оценками (Hoaglin и др., 1983). Взвешенные оценки вычисляются путем решения уравнений, где W является диагональной квадратной матрицей, имеющей диагональные элементы в качестве весов.

$$\hat{\beta} = (X^T W X)^{-1} X^T W y. \quad (5)$$

Ψ -функция Хьюбера определяется, как

$$\psi(t) = \begin{cases} -a, & t < -a, \\ t, & -a \leq t \leq a, \\ a, & t > a, \end{cases} \quad (6)$$

где a – так называемая константа настройки.

Сниженные М-оценки. Сниженные М-оценки были введены Hampel, который использовал три части сниженных оценок с ρ -функциями, ограниченная ψ -функция принимает значение 0 для больших (Хампель и др., 1986) $|t|$. Состоящая из трех частей сниженная ψ -функция Хампеля определяется как

$$\psi(t) = \begin{cases} \operatorname{sgn}(t)|t|, & \text{если } 0 \leq |t| < a, \\ \operatorname{asgn}(t), & \text{если } a \leq |t| < b, \\ \{(c - |t|)/(c - b)\}\operatorname{asgn}(t), & \text{если } b \leq |t| < c, \\ 0, & c \leq |t|, \end{cases} \quad (7)$$

(Hoaglin и др.). Возникает потребность в ψ -функции сглаженно сниженной природы. Некоторые сглаженно сниженные М-оценки были предложены разными авторами. Реальные улучшения были получены Эндрюсом (Andrews, 1974) и Тьюки (Mosteller и Tukey 1977; Hoaglin и др., 1983), которые использовали волновые оценки (также называемые синус-оценки) и бивейт оценки, соответственно. И волна Эндрюса и бивейт оценки Тьюки являются сглажено сниженными ψ -функциями. Потом Кадир (1996) предложил ψ -функцию, с весовой функцией бета-функцией с $\alpha = \beta$. Волновая функция Эндрюса

$$\psi(t) = \begin{cases} a \sin\left(\frac{t}{a}\right), & |t| \leq \pi a \\ 0 & |t| > \pi a. \end{cases} \quad (8)$$

Бивейт функция Тьюки

$$\psi(t) = \begin{cases} t \left[1 - \left(\frac{t}{a} \right)^2 \right]^2, & |t| \leq a, \\ 0, & |t| > a. \end{cases} \quad (9)$$

Результаты моделирования по методу Андрюса, Тьюки в сравнении с методом наименьших квадратов приведены ниже. В качестве примера исследован известный набор данных, взятый из Rousseeuw и Leroy (1987). Этот пример выбран, потому что этот реальный набор данных [4-6] был рассмотрен многими статистиками, такими как Daniel и Wood (1971), Andrews (1974), Andrews и Pregibon (1978), Cook (1979), Draper и Smith (1981), Dempster и Gasko-Green (1981), Atkinson (1982), Rousseeuw и Leroy (1984), Carroll и Rupert (1985), Qadir (1996) и некоторыми другими с помощью различных методов. Данные описывают работу установки для окисления аммиака в азотную кислоту и состоят из 21 четырехмерных наблюдений. Stackloss (y) должен быть объяснен скоростью работы (x_1), температурой охлаждающей воды на входе (x_2), и концентрацией кислоты (x_3).

Таблица 1 – Исходные данные, описывающие работу установки для окисления аммиака в азотную кислоту

| N_{Φ} | Y | x_1 | x_2 | x_3 |
|------------|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 42 | 80 | 27 | 89 |
| 2 | 37 | 80 | 27 | 88 |
| 3 | 37 | 75 | 25 | 90 |
| 4 | 28 | 62 | 24 | 87 |
| 5 | 18 | 62 | 22 | 87 |
| 6 | 18 | 62 | 23 | 87 |
| 7 | 19 | 62 | 24 | 93 |
| 8 | 20 | 62 | 24 | 93 |
| 9 | 15 | 58 | 23 | 87 |
| 10 | 14 | 58 | 18 | 80 |
| 11 | 14 | 58 | 18 | 89 |
| 12 | 13 | 58 | 17 | 88 |
| 13 | 11 | 58 | 18 | 82 |
| 14 | 12 | 58 | 19 | 93 |
| 15 | 8 | 50 | 18 | 89 |
| 16 | 7 | 50 | 18 | 86 |
| 17 | 8 | 50 | 19 | 72 |
| 18 | 8 | 50 | 19 | 79 |
| 19 | 9 | 50 | 20 | 80 |
| 20 | 15 | 56 | 20 | 82 |
| 21 | 15 | 70 | 20 | 91 |

В результате моделирования были получены следующие оценки.

$$E(y) = -39.919 + 0.716 x_1 + 1.295 x_2 - 0.152 x_3, \quad (10)$$

$$E(y) = -37.652 + 0.798 x_1 + 0.577 x_2 - 0.067 x_3, \quad (11)$$

$$E(y) = -37.061 + 0.821 x_1 + 0.513 x_2 - 0.074 x_3, \quad (12)$$

$$E(y) = -36.908 + 0.827 x_1 + 0.495 x_2 - 0.075 x_3. \quad (13)$$

Уравнение (10) включает оценки коэффициентов, полученные МНК. Уравнение (11) содержит оценки коэффициентов, полученные МНК с удалёнными точками 1, 3, 4 и 21. Уравнение (12) содержит соответственно оценки коэффициентов, полученные методом Андрюса ($a = 1,5$), уравнение (13) содержит оценки коэффициентов, полученные с функцией бивейт Тьюки ($a = 4,685$).

Асимптотическая вариация и эффективность M -оценок. Для больших n можно выразить $\hat{\beta}$ как примерно нормально распределенное

$$D(\hat{\beta}) \approx N_p \left(\beta, \hat{v}(X^T X)^{-1} \right), \quad (14)$$

$$\text{где } \hat{\sigma} = \hat{\sigma}^2 \frac{\text{ave}_i \left\{ \psi(r_i / \hat{\sigma})^2 \right\}}{\left[\text{ave}_i \left\{ \psi'(r_i / \hat{\sigma}) \right\} \right]^2} \frac{n}{n-p}, \quad (15)$$

где $\text{ave}_i(z_i)$ – среднее набора данных z .

На практике можно оценить

$$\begin{aligned} \left| E(\psi^2) \right| & \text{ как } \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \psi^2 \\ \text{и } \left[E(\psi') \right]^2 & \text{ как } \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \psi' \right)^2. \end{aligned}$$

Новая ψ -функция. Новая ρ -функция, предложена в семействе гладко сниженных М-оценок [7]. ψ -функция, связанная с этой ρ -функцией, достигает гораздо большей линейности в центральной части прежде, чем она спадает, по сравнению с другими ψ -функциями, такими, как синус Эндрюса, бивейт Тьюки и Кадира бета-функция, в результате ее повышенной эффективности. Многократно ревзвешенный метод наименьших квадратов (IRLS) на основе предложенной ρ -функции явно обнаруживает выбросы и игнорирует выбросы, которые уточняются при последующем анализе. Метод действительно достигает целей, ради которых он построен, потому что дает улучшенные результаты во всех ситуациях и способен выдержать значительное количество выбросов. Предлагаемая ψ -функция [7] приведена ниже.

$$\psi(t) = \begin{cases} \frac{2t}{3} \left(1 - \left(\frac{t}{a} \right)^4 \right)^2, & \text{если } |t| \leq a, \\ 0, & \text{если } |t| > a, \end{cases} \quad (16)$$

где a – так называемая константа настройки и для i -ого наблюдения переменная t – остатки, шкалированные MAD.

ρ – функция, соответствующая ψ -функции, приведенной выше, удовлетворяет стандартным свойствам, как правило связанным с обоснованной целевой функцией.

Объединенный метод робастного и гребневого оценивания. Можно заметить, что слаженно сниженные М-оценки ведут себя очень плохо, если ошибки действительно нормально распределены.

Из [7] видно, что асимптотическая вариация и эффективность предложенной ψ функции, намного улучшены по сравнению с другими версиями.

Более эффективным представляется объединение робастного и гребневого оценивания. В этом случае используем следующие соотношения, применяя робастную и гребневую оценку. Для набора данных регрессии (X, y) с $X \in R^{n \times p}$ и $y \in R^n$

$$\hat{\beta} = (\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1) = \arg \min \{L(X, y, \beta) : \beta_0 \in R, \beta_1 \in R^P\}, \quad (17)$$

$$L(X, y, \beta) = \sum_{i=1}^n \rho \left(\frac{r_i(\beta)}{\hat{\sigma}_{ini}} \right) + \frac{\lambda}{\hat{\sigma}_{ini}^2} \|\beta_1\|^2, \quad (18)$$

$$r = (r_1, \dots, r_n)^T = (y - \hat{\beta}_0 1_n - X \hat{\beta}_1)$$

Как известно, классическая оценка гребневой регрессии (RR) соответствует нормальным уравнениям

$$\begin{aligned} \hat{\beta}_0 &= \bar{y} - \bar{x}^T \hat{\beta}_1, \\ (X^T X + \lambda I_p) \hat{\beta}_1 &= X^T (y - \hat{\beta}_0 1_n) \end{aligned} \quad (19)$$

I_p – единичная матрица, \bar{x} и \bar{y} – средние X и y соответственно.

Система уравнений, соответствующая робастной гребневой оценке (RRR)

$$\psi(t) = \rho'(t), W(t) = \frac{\psi(t)}{t}. \quad (20)$$

Пусть

$$\sigma = \hat{\sigma}(r(\hat{\beta})), t_i = \frac{r_i}{\sigma}, \omega_i = \frac{\psi(t_i)}{2t_i},$$

$$w = (\omega_1, \dots, \omega_n)^T, \quad (21)$$

$$W = \text{diag}(w).$$

Приравняем производную по β в (18) нулю для RRR.

$$\begin{aligned} w^T (y - \hat{\beta}_0 1_n - X \hat{\beta}_1) &= 0, \\ (X^T W X + \lambda I_p) \hat{\beta}_1 &= X^T W (y - \hat{\beta}_0 1_n). \end{aligned} \quad (22)$$

В результате исследований было доказано, что оценивание на основе обоих смещенных и робастных методов может быть полезной процедурой в тех случаях, когда наборы данных подвержены одновременно неортогональности и ненормальными ошибками. Процедура оценки состоит из увеличения исходного набора данных так, что обычный метод наименьших квадратов даёт смешенную оценку данных. Затем многократно ревзвешенный метод наименьших квадратов, (IRLS) предполагающий итеративную процедуру, может быть использован для получения результирующих робастных и гребневых оценок.

Таблица 2 – Остатки, полученные по методу Андрюса, методу Тьюки, робастной гребневой регрессии с ψ -функцией в сравнении с методом МНК

| № | У | Остатки МНК | Остатки МНК без выброс | Остатки Андрюс | Остатки Тьюки | Остатки RRR с ψ - функцией |
|----|----|----------------|------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------------------|
| 1 | 42 | 3,24 | <u>6,22</u> | <u>6,02</u> | <u>6,04</u> | <u>5,87</u> |
| 2 | 37 | -1,92 | 1,15 | 0,95 | 0,96 | 0,84 |
| 3 | 37 | 4,56 | <u>6,43</u> | <u>6,23</u> | <u>6,24</u> | <u>5,96</u> |
| 4 | 28 | 5,70 | <u>8,17</u> | <u>8,25</u> | <u>8,26</u> | <u>8,31</u> |
| 5 | 18 | -1,71 | -0,67 | -0,74 | -0,74 | -0,88 |
| 6 | 18 | -3,01 | -1,25 | -1,24 | -1,24 | -1,28 |
| 7 | 19 | -2,39 | -0,42 | -0,30 | -0,28 | -0,49 |
| 8 | 20 | -1,39 | 0,58 | 0,71 | 0,72 | 0,50 |
| 9 | 15 | -3,14 | -1,06 | -0,94 | -0,93 | -0,89 |
| 10 | 14 | 1,27 | 0,36 | 0,04 | 0,02 | -0,09 |
| 11 | 14 | 2,64 | 0,96 | 0,72 | 0,69 | 0,20 |
| 12 | 13 | 2,78 | 0,47 | 0,15 | 0,11 | -0,43 |
| 13 | 11 | -1,43 | -2,51 | -2,81 | -2,83 | -3,03 |
| 14 | 12 | -0,05 | -1,35 | -1,48 | -1,5 | -2,08 |
| 15 | 8 | 2,36 | 1,34 | 1,33 | 1,33 | 1,00 |
| 16 | 7 | 0,91 | 0,14 | 0,10 | 0,09 | -0,10 |
| 17 | 8 | -1,52 | -0,37 | -0,45 | -0,46 | 0,05 |
| 18 | 8 | -0,46 | 0,1 | 0,07 | 0,07 | 0,27 |
| 19 | 9 | -0,60 | 0,59 | 0,65 | 0,65 | 0,89 |
| 20 | 15 | 1,41 | 1,93 | 1,84 | 1,83 | 1,86 |
| 21 | 15 | -7,24 | <u>-8,63</u> | <u>-9,05</u> | <u>-9,07</u> | <u>-9,74</u> |

При моделировании были получены следующие оценки коэффициентов.

$$E(y) = -39.883 + 0.849 x_1 + 0.404 x_2 - 0.032 x_3. \quad (23)$$

Уравнение (23) содержит оценки коэффициентов, полученные с применением робастных и гребневых оценок с функцией $\psi(t)$ ($a = 2$). Параметр λ определяется согласно методу, приведенному в [8].

Из табл. 2 видно, что робастные процедуры по методу Андрюса ($a = 1,5$) и методу Тьюки ($a = 4,685$) ведут к идентификации четырёх выбросов и дают те же оценки, что и метод наименьших квадратов, когда из данных удалены четыре выброса.

Из таблицы также видно, что предложенный объединённый метод робастного и гребневого оценивания, основанный на ψ -функции ($a = 2$), подтверждает факт, что наблюдения 1, 3, 4 и 21 являются выбросами, так как предложенный метод даёт высокие величины остатков для этих наблюдений.

Выходы. Применение объединённых робастных и гребневых оценок позволяет получить сходимость к итоговым оценкам коэффициентов с меньшим количеством итераций, чем без использования гребневых оценок. Использование разработанной процедуры приводит к получению устойчивых коэффициентов и остатков, которые позволяют определить истинные коэффициенты и выбросы. Оценки, полученные с ψ -функцией, автоматически находят эти коэффициенты и определяют выбросы. Главное преимущество заключается в обнаружении наблюдений для дальнейшего изучения.

Список литературы: 1. Owen A. A robust hybrid of lasso and ridge regression // Technical report, Stanford University, CA. – 2006. – P. 1-14. 2. Alma Ö. Gürünlu. Comparison of Robust Regression Methods in Linear Regression // Int. J. Contemp. Math. Sciences. – 2011. – Vol. 6, no. 9. – P. 409-421. 3. Qadir, M.F. Robust Method for Detection of Single and Multiple Outliers / M. F. Qadir // Scientific Khyber. –1996. – Vol. 9. – P. 135-144. 4. Deniel C. and Wood F.S. Fitting Equations to Data, John Wiley and Sons. – New York, 1999. – 459 p. 5. Rousseeuw P.J. and Leroy A.M. Robust Regression and Outlier Detection, John Wiley and Sons. – New York, 1987. – 334p. 6. Rousseeuw P.J. and Hubert M. Recent Development in PROGRESS //Computational Statistics and Data Analysis. – 1996. – Vol. 21. – P. 67-85. 7. Asad, A.A. Modified M-Estimator for the Detection of Outliers / A. Asad, M.F. Qadir // Pakistan Journal of Statistics and Operation Research. – 2005. – Vol. 1. – P. 49-64. 8. Грицюк В.И. Модифицированный алгоритм наименьших квадратов и выбор модели. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия Автоматика и приборостроение. – 2004. – № 17. – С. 47-50.

Bibliografy (transliterated): 1. Owen, A. "A robust hybrid of lasso and ridge regression". *Technical report, Stanford University, CA.* (2006): 1-14. Print. 2. Alma, Ö. Gürünlu. "Comparison of Robust Regression Methods in Linear Regression", *Int. J. Contemp. Math. Sciences.* Vol 6, No 9 (2011): 409-421. Print. 3. Qadir, M.F. "Robust Method for Detection of Single and Multiple Outliers", *Scientific Khyber.* 9 (1996): 135-144. Print. 4. Deniel, C. and Wood, F.S. *Fitting Equations to Data.* New York: John Wiley and Sons, (1999): 459. Print. 5. Rousseeuw, P.J. and Leroy, A.M. *Robust Regression and Outlier Detection.* New York: John Wiley and Sons, (1987): 334. Print. 6. Rousseeuw, P.J. and Hubert, M. "Recent Development in PROGRESS". *Computational Statistics and Data Analysis.* 21 (1996): 67-85. Print. 7. Asad, A. and Qadir, M.F. "A Modified M-Estimator for the Detection of Outliers." *Pakistan Journal of Statistics and Operation Research.* 1 (2005): 49-64. Print. 8. Gritsyuk, V.I. "The modified least squares algorithm and model choice". *Vestnik of National Technical University "KPI", Series Automation and priborostroenie.* 17 (2004): 47-50. Print.

Поступила (received) 28.02.2015



Грицюк Вера Ільїнічна, кандидат технических наук, доцент кафедры "Проектирование и эксплуатация электронных аппаратов" Харьковского национального университета радиоэлектроники. Заштила диплом инженера-электрика по специальности "Автоматика и телемеханика" в 1971г. в Харьковском институте радиоэлектроники, диссертацию кандидата технических наук в Харьковском государственном техническом университете радиоэлектроники по специальности "Управление в технических системах" в 1995г. Научные интересы: стохастические системы управления.

ПРИСТРОЇ ТА МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК 620.179.14

В.Ф. БЕЗОТОСНЫЙ, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорожье

В.В. КОЗЛОВ, канд. техн. наук, доц., ЗНТУ, Запорожье

О.В. НАБОКОВА, доц., ЗНТУ, Запорожье

ПРИМЕНЕНИЕ ТОКОВИХРЕВОГО ЧАСТОТНОГО БАЛАНСА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ НАКЛАДНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

В работе показано, что электромагнитные преобразователи, основанные на использовании токовихревого частотного баланса, позволяют практически полностью избавиться от влияния воздушных зазоров между преобразователем и контролируемой деталью. Их можно успешно использовать для контроля электромагнитных свойств ферромагнитных материалов по частоте баланса. Это позволяет без промежуточных преобразований использовать цифровую измерительную аппаратуру.

Ключевые слова: токовихревой преобразователь, токовихревой частотный баланс, ферромагнитные материалы, электромагнитные свойства.

Введение. Для исследования электромагнитных свойств ферромагнитных материалов широко используются токовихревые преобразователи, принцип действия которых основан на измерении наводимой в измерительной обмотке ЭДС, значение которой зависит от свойств исследуемого материала. Оптимальная частота намагничивающего тока для конкретного материала обычно подбирается экспериментально.

Постановка проблемы. Недостатком большинства существующих конструкций таких преобразователей является зависимость выходного сигнала не только от электромагнитных свойств исследуемого материала, но и от размеров зазоров под полюсами, которые трудно контролировать в процессе измерений [1-4].

Целью настоящей работы разработка и анализ конструкции токовихревого преобразователя лишенного этого недостатка.

Материалы исследования. Принцип действия преобразователя, показанного на рис. 1, основан на токовихревом частотном балансе. Это позволяет практически полностью избавиться от влияния воздушных зазоров при некоторых их рациональных размерах и контролировать электромагнитные свойства ферромагнитных материалов, так как в качестве выходной информации используется частота намагничивающего тока. Преобразователь выполнен из трех

© В.Ф. Безотосный, В.В. Козлов, О.В. Набокова, 2015

П-образных магнитопроводов 3, 4 и 5, имеет обмотку намагничивания 1, охватывающую все три магнитопровода и измерительную обмотку 2, расположенную на среднем – измерительном магнитопроводе. Боковые магнитопроводы предназначены для создания в исследуемом материале корректирующих магнитных потоков, так как ограничивают область распространения магнитного потока проходящего через измерительный магнитопровод. При измерениях преобразователь устанавливается на исследуемый ферромагнитный материал 6.

Рис. 2 иллюстрирует характер распространения магнитного потока, создаваемого преобразователем, на поверхности исследуемого материала.

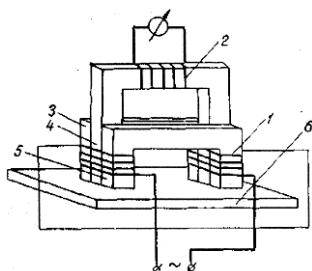


Рис. 1 – Конструкция преобразователя

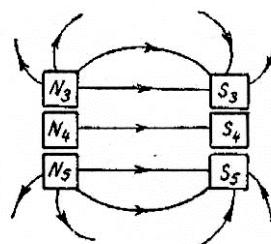


Рис. 2 – Распределение магнитного потока

В этом случае контролируемый участок материала ограничен шириной полюса среднего магнитопровода b , несущего измерительную обмотку, и активной базой преобразователя l . Тогда магнитный поток, проходящий в области ферромагнетика шириной b [6], определится соотношением

$$\Phi = \frac{\mu}{\sqrt{2}} \delta b H_0 e^{-j\frac{\pi}{4}} = \frac{\mu}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_a \gamma}} b H_0 e^{-j\frac{\pi}{4}}, \quad (1)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость исследуемого материала; γ – электропроводность материала; f – частота намагничивающего тока; H_0 – напряженность магнитного поля на поверхности исследуемого материала; δ – глубина проникновения магнитного поля. Соотношение (1) можно представить в следующем виде

$$\Phi = \mu_\phi b H_0 e^{-j\frac{\pi}{4}},$$

где $\mu_{\phi} = \frac{\mu}{\sqrt{2}} \delta$ – фиктивная магнитная проницаемость материала.

При отсутствии ферромагнитной среды, то есть при наличии диэлектрической среды под полюсами преобразователя, магнитный поток, проходящий через средний магнитопровод, равен $\Phi_d = \mu_o H_o S_{cp}$, где S_{cp} – среднее сечение диэлектрической среды, через которое проходит магнитный поток.

Покажем, что существует частота намагничивающего тока, при котором в результате действия вихревых токов магнитный поток, проходящий в области ферромагнетика, расположенного под полюсами среднего магнитопровода, уменьшится до значения магнитного потока, проходящего в диэлектрической среде. Значение этой частоты найдем из уравнения

$$\Phi_d = \Phi_{cp}. \quad (2)$$

Соотношение (2) будет выполняться при равенстве магнитного сопротивления ферромагнетика и диэлектрической среды, расположенной под полюсами магнитопровода с измерительной обмоткой. С учетом выражения (1) для модуля магнитного сопротивления ферромагнетика получим

$$Z_m = \frac{l}{\mu_{\phi} b} = \frac{l\sqrt{2f\mu\gamma}}{50,3\mu b}. \quad (3)$$

Для магнитного сопротивления диэлектрической среды под полюсами преобразователя, согласно [7], можно записать

$$R_m = \frac{1}{\frac{\mu_o b}{\pi} \ln \frac{m + \sqrt{2m - 1}}{m - 1}}, \quad (4)$$

где m – определяется расстоянием между полюсами преобразователя l и их шириной a в направлении активной базы

$$m = \frac{l + 2a}{2a}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (3) и (4) в уравнение (2), получим

$$\frac{l\sqrt{2f\mu\gamma}}{50,3\mu b} = \frac{1}{\frac{\mu_o b}{\pi} \ln \frac{m + \sqrt{2m - 1}}{m - 1}} \quad (6)$$

Соотношение (6) может иметь место при значительном значении вихревых токов, когда основной магнитный поток Φ ослабляется ими

до значения, определяемого магнитным сопротивлением диэлектрической среды. Частота, соответствующая этому случаю (назовем ее частотой токовихревого баланса ЧТБ), может быть определена из выражения (6). Путем несложных преобразований получим

$$f = \frac{2500\mu\pi^2}{l^2\mu_0\gamma \left[\ln \frac{m + \sqrt{2m - 1}}{m - 1} \right]}. \quad (7)$$

Полученное соотношение (7) соответствует реальному физическому смыслу: чем больше магнитная проницаемость материала, тем больше при одной и той же напряженности магнитного поля магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, а, следовательно, выше частота намагничивающего поля для выполнения равенства (2). При увеличении электропроводности материала сильнее проявится действие вихревых токов, создающих магнитный поток, ослабляющих основной. Следовательно, равенство (2) будет выполнено при меньшей частоте поля.

Из соотношения (7) следует, что ЧТБ определяется прежде всего электромагнитными свойствами ферромагнетика: магнитной проницаемостью и электропроводностью, то есть по ЧТБ можно судить о электромагнитных свойствах этих материалов.

ЧТБ соответствует случаю, когда магнитное сопротивление исследуемого материала равно сопротивлению воздушной среды под полюсами. Это позволяет предположить, что незначительные колебания зазора под полюсами (при некотором их рациональном размере) не повлияют на ЧТБ. На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость ЧТБ от размера воздушного зазора при установке преобразователя с активной базой, равной 15 мм, на образец из стали марки Х12Ф1. Как следует из графика, при размере воздушного зазора 0,5 мм его колебания в пределах $\pm 0,2$ мм незначительно влияют на частоту токовихревого баланса.

На рис. 4 приведены результаты практического применения накладного преобразователя при определении остаточных напряжений в образце. Напряжения определялись в образце из стали марки Х12Ф1 при стравливании слоев материала в растворе ортофосфорной кислоты с хромовым ангидридом. Значение механических напряжений σ рассчитывалось по методике, приведенной в [8]. Анализ полученных зависимостей показывает, что по ЧТБ можно также судить о

распределении механических напряжений по глубине материала, используя тарировочный график.

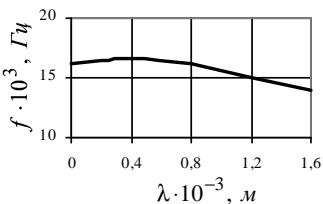


Рис. 3 – Экспериментальная зависимость ЧТБ от размера воздушного зазора

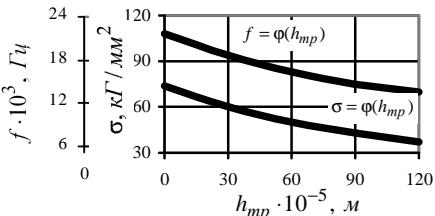


Рис. 4 – Результаты практического применения накладного преобразователя работающего на принципе токовихревого баланса: h_{mp} – глубина стравленного слоя

Выводы. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что преобразователи, в которых используется принцип токовихревого баланса, могут успешно применяться для контроля электромагнитных свойств ферромагнитных материалов по балансной частоте намагничивающего тока, что позволяет непосредственно без промежуточных преобразований использовать цифровую измерительную технику.

Список литературы: 1. Безотосный В.В., Козлов В.В., Набокова О.В. Частотный метод контроля качества гальванопокрытий. // Електротехніка та електромеханіка. – 2011 – №1. – С. 3-5. 2. Безотосний В.В., Власенко Э.В. Учет энергетических факторов при расчете намагнченности ферромагнитных материалов. // Електротехніка та електроенергетика. – 2004. – № 1. – С. 13-17. 3. Безотосний В.В., Власенко Е.В., Козлов В.В., Набокова О.В., Афанасьева И.О. Деякі актуальні напрямки неруйнуючого контролю властивостей матеріалів електромагнітними методами. // Електротехніка та електромеханіка. – 2008. – № 6. – С. 12-15. 4. Безотосний В.В., Козлов В.В., Набокова О.В. К вопросу повышения точности расчета выходных характеристик базового многофункционального магнитоупругого датчика. // Вестник национального технического университета "ХПІ". – 2010. – № 48. – С. 56-59. 5. Безотосний В.В., Власенко Э.В. Метод контроля механических напряжений. // Електричний журнал. – 1998. – № 2(8). – С. 24-27. 6. Ламмеранер И., Штафль М. Вихревые токи. – М., Энергия, 1987. – 210 с. 7. Константинов О.Я. Расчет и конструирование магнитных и электромагнитных приспособлений. – Л., Машиностроение, 1967. – 275 с. 8. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М., Машгиз, 1968. – 154 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bezotosnyj V.V., Kozlov V.V., Nabokova O.V. "Chastotnyj metod kontrolja kachestva gal'vanopokrytij". Elektrotehnika ta elektromehanika. 1 (2011): 3-5. Print. 2. Bezotosnyj V.V., Vlasenko Je.V. "Uchet energeticheskikh faktorov pri raschete namagnichennosti ferromagnitnyh materialov". Elektrotehnika ta elektroenergetika. 1 (2004): 13-17. Print. 3. Bezotosnij V.V., Vlasenko E.V., Kozlov V.V., Nabokova O.V., Afanas'eva I.O. Остаточные напряжения. – М., Mashgiz, 1968. – 154 c.

"Dejaki aktual'ni naprijamki ne rujujuchogo kontrolju vlastivostej materialiv elektromagnitnimi metodami". *Elektrotehnika ta elektromehanika*. 6 (2008): 12-15. Print. 4. Bezotosnyj V.V., Kozlov V.V., Nabokova O.V. "K voprosu povyshenija tochnosti rascheta vygodnyh harakteristik bazovogo mnogofunkcional'nogo magnitouprugogo datchika". *Vestn. nacional'nogo tehnicheskogo universiteta "HPI"*. 48 (2010): 56-59. Print. 5. Bezotosnyj V.V., Vlasenko Je.V. "Metod kontrolja mehanicheskikh naprijazhenij". *Elektrichniy zhurnal*. 2 (8) (1998): 24-27. Print. 6. Lammerer I., Shtafl M. *Vihrevye toki*. Moscow: Jenergija, 1987. Print. 7. Konstantinov O.Ja. *Raschet i konstruirovaniye magnitnyh i elektromagnitnyh prispособлений*. Saint Petersburg: Mashinostroenie, 1967. Print. 8. Birger I.A. *Ostatochnye naprijazhenija*. Moscow: Mashgiz, 1968. Print.

Поступила (received) 22.10.2014



Безотосный Владимир Федорович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретической и общей электротехники» Запорожского национального технического университета. Защитил диплом инженера-конструктора, технолога радиоэлектронной аппаратуры в ЗМИ, диссертацию кандидата технических наук в МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1989 г. по специальности "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления". Одним из научных направлений являются вопросы электромагнитного неразрушающего контроля свойств материалов.



Козлов Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретической и общей электротехники» Запорожского национального технического университета (бывший Запорожский машиностроительный институт). Защитил диплом инженера-электрика по специальности "Электроснабжение промышленный предприятий, городов и сельского хозяйства" в ЗМИ, диссертацию кандидата технических наук в НТУ ХПИ по специальности "Электрические машины и аппараты" в 2004 г. Основное направление научной деятельности - вопросы теплообмена в силовых трансформаторах.



Набокова Ольга Владимировна, доцент кафедры «Теоретической и общей электротехники» Запорожского национального технического университета (бывший Запорожский машиностроительный институт). Защищила диплом инженера-электромеханика по специальности "Электрические машины и аппараты" в ЗМИ. Основным направлением научной деятельности являются вопросы методологии преподавания курса "Теоретические основы электротехники" на английском языке. Автор учебного пособия с грифом МОН Украины для студентов-электриков с английским языком преподавания "**Theoretical Electrical Engineering**" (2013 г.).

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ

УДК 621.355.1

А.И. ВАЖИНСКИЙ, канд. техн. наук, начальник участка ПАО "МК "Азовсталь", Мариуполь

А.А. ГУСЕВ, начальник участка ПАО "МК "Азовсталь", Мариуполь

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ГЛАВНЫХ ПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ПРОКАТА

Проведено исследование системы измерения длины проката в сортопрокатном цехе. Предложен комплекс, основанный на математической модели процесса прокатки и диагностических данных привода стана 650. В статье приводится описание математического моделирования системы управления комплексом. Полученные теоретические результаты послужили основой при реализации подсистемы измерения.

Ключевые слова: математическая модель, измерение длины, главный привод, масштабирование, система визуализации.

Вступление. Задача оптимального раскроя материалов является одной из самых важных в ресурсосберегающих технологиях, т.к. ведет к экономии материалов и снижению отходов [1, 2]. Одним из вариантов такой задачи является оптимальная порезка на мерные длины.

Цель. Достижение требуемой точности в измерении длины прокатной заготовки достигается созданием соответствующей системы. Как основу автоматической системы измерения предлагается использовать диагностические данные привода прокатной клети и математическую модель прокатки.

Постановка проблемы. Рассматриваемая задача состоит в разработке автоматизированной системы оптимизации реза на мерные длины металлопроката. Задача усложняется тем, что порезка ведется в режиме реальной прокатки, т.е. на момент прибытия металла к линии пил горячей резки точная его длина еще не известна.

Материалы исследований. Так как движение не равнопеременное, то график скорости $\omega = f(t) \neq \text{const}$. График представляет собой некоторую кривую. Измеренная длина будет равна площади, ограниченной кривой скорости и координатными осями

© А.И. Важинский, А.А. Гусев, 2015

скорости и времени. По положительному фронту сигнала датчика, установленного после клети, устанавливается признак начала процесса прокатки. Оценка спада величины тока нагрузки двигателя ниже служит для идентификации момента окончания процесса прокатки.

На рис. 1 представлен график изменения скорости прокатки во времени (рис. 1). Площадь фигуры, ограниченной графиком скорости прокатки (рис. 1), определяется при помощи численных методов интегрирования. Математическое описание представлено формулами (1)-(2):

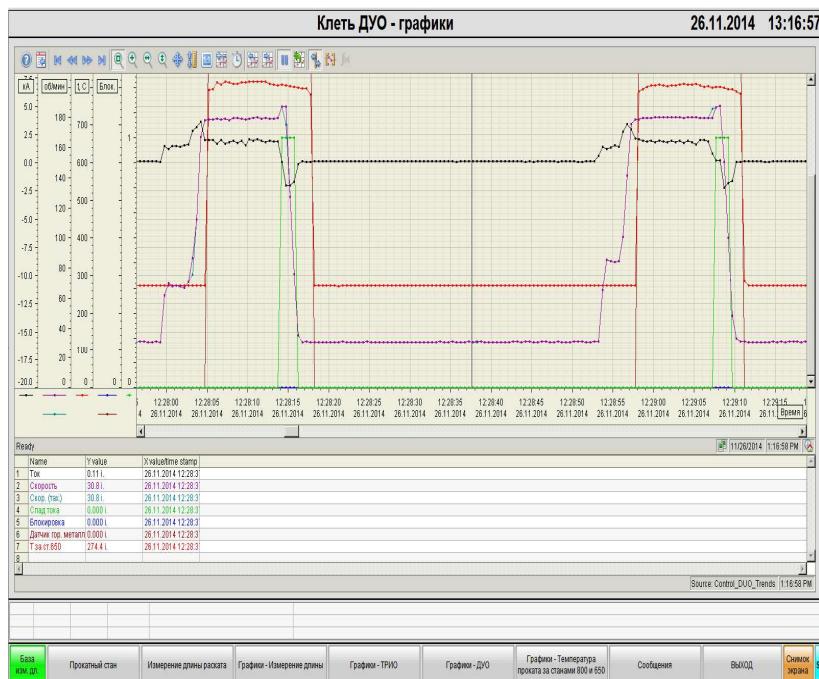


Рис. 1 – График изменения скорости прокатки

Величина определенного интеграла численно равна площади фигуры, образованной графиком функции скорости прокатки и осью времени. Следовательно, найти длину проката – это значит оценить площадь фигуры, ограниченной перпендикулярами, восстановленными к графику подынтегральной функции $f(\omega)$ из точек a и b , расположенных на оси t .

Если заменить полученные криволинейные фрагменты графика функции отрезками прямых, то тогда приближенно площадь фигуры, а, следовательно, и величина определенного интеграла оценивается как площадь всех полученных трапеций. Обозначим последовательно значения подынтегральных функций на концах отрезков $f_0, f_1, f_2, \dots, f_n$ и подсчитаем площадь трапеций (1):

$$\int_a^b f(\omega) dx = h \left(\frac{f_0 + f_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f_i \right) = \frac{b-a}{n} \left(\frac{f_0 + f_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f_i \right), \quad (1)$$

где f_i – значение подынтегральной функции в точках разбиения интервала $[a, b]$ на равные участки с шагом h .

При необходимости, можно вычислить величину остаточного члена. Остаточный член – это разность между заданной функцией и функцией ее аппроксимирующей. Тем самым оценка остаточного члена является оценкой точности рассматриваемой аппроксимации.

В нашем случае, остаточный член пропорционален длине интервала $[a, b]$ и квадрату шага h (2):

$$R = -\frac{(b-a)h^2}{12} \cdot f''(\xi), \xi \in [a, b] \quad (2)$$

Текущая длина определяется выражением (3):

$$L_c = L_c + \Delta L, \quad (3)$$

где ΔL – длина проката на последнем цикле измерения. Определяется величина путем применения численных методов интегрирования (1) – (2). Длина проката ΔL может быть выражена как:

$$\Delta L = \frac{\omega_i + \omega_{i-1}}{60000} \cdot \frac{t_i}{1000} \cdot \pi \cdot D_{\text{расч.}}, \quad (4)$$

где ω_i, ω_{i-1} – угловые скорости на текущем и предыдущем цикле измерения; t_i – длительность цикла измерения; $D_{\text{расч.}}$ – расчетный диаметр прокатного вала.

В процессе прокатки заготовка проходит ряд контрольных точек, расположенных на определенных расстояниях от оси клети. Таких точек четыре: 18,02; 32,04; 48,7; 62,47 метра. Событие пересечения заготовкой контрольной (реперной) точки фиксируется лазерным датчиком положения и передается в программируемый логический контроллер (ПЛК). Расстояние от прокатной клети до определенной реперной точки записывается в переменную L_r . Время окончания прокатки определяется посредством анализа диагностических данных САУ приводом клети (спад тока двигателя ниже 0,5 кА). Текущая длина записывается в соответствующую переменную $L_m = L_c$.

Тогда общая длина проката будет определена в соответствие с (5):

$$L = L_r + \frac{L_m}{k_r} + \frac{L_\Delta}{k_r}, \quad (5)$$

где k_r – коэффициент автоподстройки, позволяющий учесть в автоматическом режиме фактическое отклонение текущей длины проката от контрольной, L_Δ – поправочная длина.

Результаты исследований. Основной экран системы визуализации имеет вид (рис. 2). Настройка актуального профиля для прокатки в клети ДУО стана 650 и просмотр данных об измеренных длинах проката осуществляется на экране "Измерение длины раската".

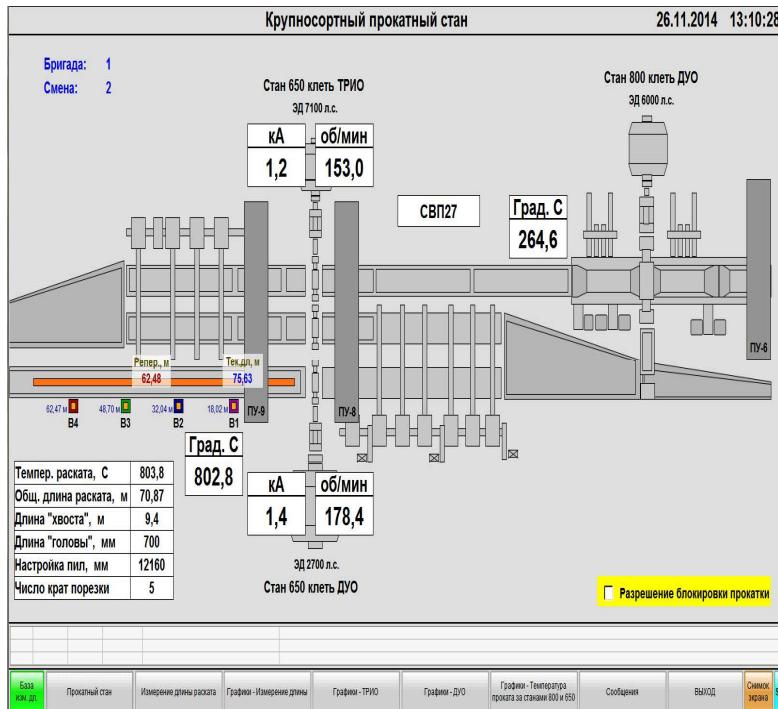


Рис. 2 – Основное окно системы поддержки принятия решений

Для расчета длины проката необходимо выбрать из выпадающего списка нужный профиль, который планируется прокатывать в клети ДУО стана 650. В поле "Предв." появятся данные по профилю:

диаметры верхнего и нижнего валов клети в мм, толщина стенки в мм. В поле "Актуальн." при этом остаются данные по профилю, который находится в работе на данный момент.

Экран разделен на несколько областей:

- верхний информационный элемент содержит: имя активного пользователя, название открытого в рабочей области экрана процесса, текущие дату и время;

- рабочая область содержит открытый экран технологического процесса, графиков, сообщений и др.;

- область активных сообщений содержит три последних активных сообщения с упорядочиванием по убыванию приоритета;

- область кнопок оператора содержит основные кнопки для переключения между экранами визуализации, выхода из системы.

Предложенная система осуществляет автоматическое измерение необходимых геометрических параметров профиля проката. Измерения осуществляются бесконтактно, в ходе прокатки, без вмешательства в технологию производства. Система обеспечивает визуализацию процесса измерения и его результатов на АРМ оператора, с возможностью архивации и удаленного доступа к просмотру. Предусмотрена интеграция результатов измерений в автоматизированную систему управления производством (АСУП).

Входящие в систему измерения датчики не имеют механического контакта с контролируемым объектом и, соответственно, погрешностей, связанных с проскальзыванием, износом, минимально требуют калибровок и проведения ППР (планово-предупредительных ремонтов).

Задачи, которые позволяет решать система:

- расчет геометрических параметров проката (длина);
- организация просмотра процесса в режиме он-лайн;
- оповещение оператора о достижении заданных размеров;
- обмен данными с АСУП;
- возможность ручного ввода технологических параметров;
- формирование отчетов по результатам измерений;
- архивация результатов измерений.

Выводы:

– алгоритм пореза проката на мерные длины должен основываться на математическом описании прокатки, что позволит добиться оптимального раскоя материала, уменьшения себестоимости производимой продукции и экономии энергоресурсов;

- повышению точности измерения длины проката способствует повышение точности измерения такого диагностического параметра электропривода как ток двигателя;
- система поддержки принятия решений участка пил прокатного стана должна разрабатываться на основе математической модели оптимального раскроя прокатной заготовки.

Список литературы: 1. Жуков С.Ф., Важинский А.И. Автоматизация процессов управления и диагностирования электротехнических комплексов металлургического производства // Технічна електродинаміка. Тем. випуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2010. – Ч. 1. – С. 181-184. 2. Бабаев Ф.В. Оптимальный раскрой материалов с помощью ЭВМ. – М: Машиностроение, 1982. – 168 с. 3. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – СПб, Изд-во "Профессия", 2003. – 752 с. .

Bibliography (transliterated): 1. Zhukov S.F., Vazhinskii A.I "Automation of management and diagnosis of electrical steel production complexes". *Tekhnicheskaiia elektrodinamika: tematicheskii vypusk "Problemy sovremennoi elektrotehniki"*. 1 (2010): 181-184. Print. 2. Babayev F.V. *Optimal'nyy raskroy materialov s pomoshch'yu EVM*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1982. Print. 3. Besekerskiy V.A., Popov Ye.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya*. Saint Petersburg: Izd-vo "Professiya", 2003. Print.

Поступила (received) 26.01.2015



Важинский Антон Иванович, 1978 г.р., Украина, закончил Приазовский государственный технический университет, аспирант ДонНТУ, начальник участка управления автоматизации ПАО «МК Азовсталь».

Основное научное направление – математическое моделирование технологических объектов в металлургии и разработка систем управления ими.



Гусев Александр Анатольевич, 1981 г.р., Украина, закончил Приазовский государственный технический университет, начальник участка управления автоматизации ПАО «МК Азовсталь».

Основное научное направление – промышленная автоматизация.

УДК 621.34.52

А.Н. МОИСЕЕВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"
В.В. ВОИНОВ, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

РЕЛЕЙНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

Представлена система релейного регулирования автономного источника электропитания для газотранспортных сетей. Составлена расчетная схема системы автоматического регулирования, определена зависимость частоты переключения релейного регулятора в зависимости от коэффициента нагрузки.

Ключевые слова: автономный источник электропитания, турбодетандер, асинхронный генератор, релейный регулятор, конденсаторное самовозбуждение.

Введение. Украинская газотранспортная система насчитывает около 1600 газораспределительных станций (ГРС) и 51000 газораспределительных пунктов (ГРП), основная задача которых, понижать давление магистрального газа. Для обеспечения функционирования электрооборудования на ГРС и ГРП требуются источники электроэнергии. Зачастую, ГРС и ГРП расположены в отдалении от электрических сетей, поэтому подведение к ним линий электроснабжения требует значительных капиталовложений.

В настоящее время понижение давления газа на существующих ГРС и ГРП осуществляется, как правило, путем дросселирования, что сопровождается значительными потерями энергии и выпадением конденсата. Для возврата конденсата в газообразное состояние необходима дополнительная энергия.

Постановка задачи исследований. На кафедре "Автоматизированные электромеханические системы" НТУ "ХПИ" был разработан, создан и запатентован автономный источник электропитания, в котором понижение давления газа осуществляется турбодетандером, а вырабатываемая им механическая энергия преобразуется в электрическую [1, 2]. Нагрузка источника носит переменный характер в зависимости от числа и мощности подключенных потребителей. Известно, что выходное напряжение асинхронного генератора с самовозбуждением существенно зависит от нагрузки [3, 4, 5, 6], в то время как к выходному напряжению автономного источника предъявляются достаточно жесткие требования по стабилизации. В запатентованной схеме предлагается стабилизировать нагрузку АГ с помощью регулируемой балластной

© А.Н. Моисеев, В.В. Воинов

нагрузки, дополняющей общую нагрузку до номинального значения. При этом в качестве балластной нагрузки используются тепло-нагревательные элементы, осуществляющие подогрев конденсата, необходимого для его перевода в газообразное состояние. Регулирование балластной нагрузки осуществляется широтно-импульсным преобразователем. Известно, что при данном способе управления частота коммутации изменяется с изменением нагрузки.

Цель работы. Оценить диапазон изменения частоты релейного регулятора и определить факторы влияющие на ее изменения.

Материал и результаты исследований. В качестве технического решения системы автоматического регулирования (САР) напряжения инвертора принято релейное регулирование напряжения постоянного тока, питающего инвертор. Это достигается замыканием – размыканием ключа K_i , соответственно подключением – отключением балластной нагрузки R_b нагревательных элементов рис. 1.

При этом подключенное либо отключенное состояние R_b определяется релейной характеристикой рис. 2.

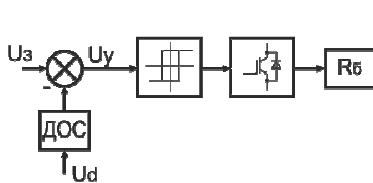


Рис. 1 – Схема релейного регулирования

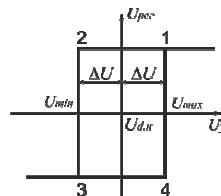


Рис. 2 – Характеристика релейного регулятора

Напряжение управления равно $U_y = U_3 - u_b k_{\text{oc}}$, где U_y – входное напряжение релейного регулятора; u_b – текущее мгновенное напряжение выпрямителя, равное напряжению на его емкости фильтра C_ϕ ; $k_{\text{oc}} = U_3/U_{d,n}$ – коэффициент передачи звена обратной связи, равный; U_3 – сигнал задания напряжения U_d .

Расчетную схему принятой релейной САР можно представить в виде рис. 3

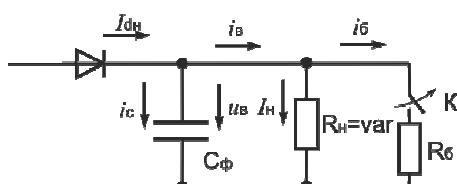


Рис. 3 – Расчетная схема САР напряжения выпрямителя

В данной схеме i_c , i_b , i_v мгновенные значения токов емкости фильтра C_ϕ постоянного тока, потребляемого инвертором и нагревателем балластного сопротивления, I_u средний входной ток инвертора, определяемый нагрузкой R_h . $I_{d.h}$ средний выпрямленный ток, соответствующий номинальной нагрузке инвертора:

При номинальной нагрузке, равной P_h балластное сопротивление к цепи постоянного тока не подключается. При нагрузке инвертора меньшей номинальной, балластное сопротивление периодически подключается ключом K , обеспечивая средний выпрямленный ток на уровне номинального $I_{d.h}$ и, тем самым, стабилизируя нагрузку асинхронного генератора (АГ). Если на интервале, предыдущем ключу K был разомкнут, и напряжение на емкости достигло значения $u_v = U_{\max}$, что соответствует точке 1 на релейной характеристике рис. 2, при этом ключ K замыкается, подключая сопротивление R_b , в результате чего происходит увеличение тока i_v , при котором $i_c = I_{d.h} - i_v$ начинается разряд конденсатора C_ϕ по экспоненциальному закону.

Зависимость частоты коммутации ключа K от нагрузки определяется по формуле (1).

$$f_k = \frac{1}{T} = \frac{\alpha I_{d.h.}(1-\alpha)}{(U_{\max} - U_{\min}) C_\phi}. \quad (1)$$

где U_{\max} - верхняя граница напряжения стабилизации; U_{\min} - нижняя граница напряжения стабилизации; C_ϕ - емкость конденсатора фильтра в звене постоянного тока; $\alpha = I_u / I_{d.h.}$ – коэффициент нагрузки инвертора; I_u - выходной ток инвертора; $I_{d.h}$ - средний выпрямленный ток; T - период коммутации.

Выражение для f_k можно представить в другом виде, если учесть, что $I_{d.f.} = U_{d.f.} / R_a$:

$$\frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{d.h.}} = 2\Delta U_d, \quad (2)$$

где $\pm\Delta U_d$ – точность регулирования напряжения.

Таким образом, на частоту коммутации влияет нагрузка инвертора, точность поддержания напряжения, емкость сглаживающего фильтра выпрямителя, сопротивление ТЭНов R_b и ширина зоны релейного регулятора ΔU_d

$$f_k = \frac{\alpha(1-\alpha)}{2\Delta U_d C_\phi R_b}. \quad (3)$$

Зависимость частоты коммутации от коэффициента нагрузки, при заданных значениях остальных величин представлены на рис. 4. Значение R_b определяется номинальной мощностью источника $P_h = 10$ кВт.

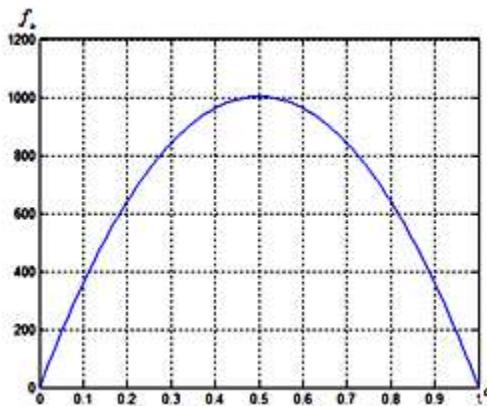


Рис. 4 – Зависимость частоты коммутации от коэффициента нагрузки

Выводы. В результате выполненной работы проведена оценка влияния на частоту f_k коэффициента нагрузки инвертора α , а также величин сопротивления балласта R_b и емкости сглаживающего фильтра C_Φ . Из (3) видно, что:

$$f_k = 0 \text{ при } \alpha = 0 \text{ и } \alpha = 1. \quad (4)$$

Что так же хорошо согласуется с физикой процесса принятого принципа автоматического регулирования. Действительно, при отсутствии нагрузки инвертора R_b должен быть постоянно подключен, т.е. ключ K замкнут, а при номинальной нагрузке – отключен – ключ K разомкнут.

Максимальная частота коммутации соответствует экстремуму функции $f_k(\alpha)$, т.е. имеет место при $\frac{df_k}{d\alpha} = 0$

$$1 - 2\alpha = 0; \alpha = \frac{1}{2} \quad (5)$$

Подставив в (3) значения максимальной частоты коммутации и точность регулирования $2\Delta U_d$ можно определить значение емкости сглаживающего фильтра.

Список литературы: 1. Пат. 41977 Україна, МПК H02P 9/00. Джерело автономного електроживлення для газотранспортних мереж / Клепиков В.Б., Колотило В.И., Моисеев А.Н.; власник Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – № u200811140; заявл. 15.09.2008; опубл. 25.06.2009, Бюл. №12. 2. Клепиков В.Б., Колотило В.І., Моісеєв О.М., Банев Є.Ф. Синтез структури источника електроенергии для газотранспортной сети // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ. –

2007. – Ч. 2, вип. 4 (45). – С. 29-30. **3.** Вишневский Л.В., Пасс А.Е. Системы управления асинхронными генераторными комплексами – К.; Одесса: "Лыбидь", 1990. – 168 с. **4.** Асинхронні енератори из вентильним та вентильно-емнісним збудженням для автономних енергоустановок: Автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.09.01 / Л.І. Мазуренко / НАН України. Ін-т електродинаміки. – К., 2001. – 37 с. – укр. **5.** Bassett E.D. and F.M. Potter. Capacitive excitation for induction generators. – IEE Transactions on Electrical Engineering. – 1975. – Vol. 54, pp. 540. **6.** Клепиков В.Б., Колотило В.І., Моисеев О.М., Банев Є.Ф. Дослідження процесів самозбудження в електротехнічній системі "Детандер-асинхронний генератор-інвертор" // Електроінформ. – 2007. – № 2. – С.6-8.

Bibliography (transliterated): **1.** Pat. 41977 Ukraine, MPK H02P 9/00. Djerelo vatonomnogo jilennja dlja gazotransportnih merez. Klepikov V.B., Kolotillo V.I., Moiseev A.N.; – u200811140; zjavl. 15.09.2008; opybl. 25.06.2009, bul. 12. Print. **2.** Klepikov V.B., Kolotillo V.I., Moiseev A.N., Banev E.F. "Sintez strukturi istochnika elektroenergiidljz gazotransportnih setei". Vesnik Kremenchyskogo Vіsnik derjavnogo universitetu imeni Ostrogradskokogo. Kremenchyk : KDPY. – 4(45) (2007): 29-30. Print. **3.** Vishnevskii L. V., Pass A.E., Sistemi ypravlenija asinchronimi generatorimi kompleksami. Kyiv : Odessa: "Libid", 1990. – 168. Print. **4.** Asynchronnie generatori s ventilno-emkostnim vozbydeniem dlja avtonomnich ystanovok: Avtoref. dis. d-ra texn. nayk: 05.09.01 / L.I. Mazyrenko / NAN Ykraini. In-t elektrodinamiki. – Kyiv, 2001. – 37 p. Print. **5.** Klepikov V.B., Kolotillo V.I., Moiseev A.N., Banev E.F. "Issledovanie processov samovozbydenija v elektromechanicheskoi sisteme "Detander-asynchronni generator-invertor". Elektroinform. 2 (2007): 6-8. Print. **6.** Bassett E.D. and F.M. Potter. "Capacitive excitation for induction generators". IEE Transactions on Electrical Engineering. 54 (1975): 540. Print.

Поступила (received) 26.03.2015



Моисеев Александр Николаевич, к.т.н., ст. преподаватель кафедры "Автоматизированные электромеханические системы", Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков.



Воинов Владимир Владимирович, к.т.н., декан Электромашиностроительного факультета Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков

РЕФЕРАТИ

УДК 621.316.13: 621.316.95

Підвищення надійності захисту електричних мереж побутового призначення за рахунок використання комплексних критеріїв спрацьовування захисних апаратів / І.С. Варшамова, О.Г. Середа, Н.Г. Фонта // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 3-19. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-3944.

Показано необхідність і можливість підвищення надійності захисту електричних мереж побутового призначення за рахунок переходу до комплексних критеріїв спрацьовування захисту, сформованим із сукупності декількох параметрів електричного кола, що захищається. Підвищення надійності забезпечується, як за рахунок розширення переліку аварійних ситуацій в електричній мережі, на які реагує захист, так і за рахунок підвищення показника безвідмовності роботи системи захисту в результаті реалізації режиму резервування відмов. Проаналізовано нові технічні рішення, що дозволяють формувати в режимі ковзного моніторингу різні типи комплексних критеріїв спрацьовування тих або інших видів захистів, шляхом використання однакових, простих для обчислень і широко використовуваних в розцеплювачах вимикачів алгоритмів інтегрування квадратів дискретних значень струму.

Ключові слова: захист, електрична мережа, ковзний моніторинг, критерії спрацьовування.

УДК 681.58: 681.32

Автоматизація керування живильними насосами енергоблоку потужністю 200 МВт / В.С. Виговський, Ю.С. Грищук // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 20-31. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведено огляд і аналіз систем керування і релейного захисту та технічних вимог до них. Обґрунтована можливість заміни релейної системи керування на автоматизовану систему на базі мікроконтролера MK51. Розроблена структурна схема автоматизованої системи керування живильними насосами енергоблоку та вибрані її елементи. Побудовано алгоритм роботи схеми автоматизованої системи керування роботою живильних насосів та їх захистом.

Ключові слова: енергоблок, живильні насоси, автоматизована система керування, мікроконтролер.

УДК 621.316

Вимоги до контактних матеріалами комутаційних пристройів / О.Г. Волкова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 32-35. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

Запропоновано перейти від використання в конструкціях сільнострумних електрических апаратів мідних сплавів як електроконтактних матеріалів на порошкові матеріали. Представлений аналіз складу порошкового матеріалу та надано рекомендації щодо кількісного складу легуючих компонентів у структурі мідної матриці. Відзначено, що складне легування мідної порошкової матриці проявляється ефектом синергетики, обумовленої каркасною структурою з легуючими компонентами, що надає утвореним твердим розчинам при достатній пластичності більш високу міцність.

Ключові слова: електричні контакти, порошковий матеріал, легуючий компонент, тверде мастило, електропровідність, теплопровідність.

УДК 621.3

Методика скінченоелементного аналізу теплового стану індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається / М.Г. Пантелят, А.В. Трофімов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електрических машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

В статті запропонована методика чисельного аналізу теплових процесів в основних конструктивних елементах індукційних кухонних плит і у посуді, що нагрівається. Математична модель розподілу температурного поля в конструкціях, що розглядаються, представляє собою нестационарне рівняння теплопровідності з граничними умовами, що описують конвективний теплообмін з оточуючим середовищем. Розрахунок виконується у двовимірній постановці методом скінчених елементів. У загальному випадку, враховуються залежності теплофізических властивостей матеріалів від температури.

Ключові слова: індукційна кухонна плита, теплове поле, комп'ютерне моделювання, метод скінчених елементів.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Вплив числа радіальних розрізів феромагнітного екрану на показники лінійного індукційно-динамічного перетворювача / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електрических машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 45-60. – Бібліогр.: 16 назв. – ISSN 2079-3944.

Запропонована концепція лінійного індукційно-динамічного перетворювача, у якого феромагнітний екран виконаний з радіальними розрізами. Встановлено, що при збільшенні кількості розрізів зменшуються індуковані струми в екрані та збільшується електродинамічна сила, яка діє на якір перетворювача. Оптимальним є феромагнітний екран з чотирма радіальними розрізами. ККД перетворювача з таким екраном підвищується на 45 % у порівнянні з ККД перетворювача з масивним екраном. В результаті експериментальних досліджень визначено, що наявність чотирьох радіальних розрізів в екрані збільшує швидкість якоря на 47 %.

Ключові слова: лінійний індукційно-динамічний перетворювач, феромагнітний екран, радіальні розрізи, експериментальні дослідження

УДК 621.316.91

Проблематика використання асинхронних генераторів на вітроелектростанції і їх моделювання / В.С. Марков, І.В. Поляков, С.М. Кожемякін // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 61-74. – Біблиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

У статті розглянуті проблеми використання асинхронних генераторів на вітроелектростанціях. Зокрема, збудження цих генераторів, вибір емностей збудження та коригуючих емностей, стабілізація напруги генератора під навантаженням, переходні процеси в асинхронному генераторі на вітроелектростанції. Розглядаються моделі асинхронного генератора на вітроелектростанції для комп'ютерного моделювання.

Ключові слова: асинхронний генератор, вітроелектростанція, проблеми асинхронних генераторів, комп'ютерне моделювання асинхронного генератора на вітроелектростанції.

УДК 621.314

Дослідження електромагнітних процесів у напівпровідниковому перетворювачі з семизонним регулюванням вихідної напруги і електромеханічним навантаженням / В.В. Михайленко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 75-80. – Біблиогр.: 10 назв. – ISSN 2079-3944.

Розроблено нові математичні моделі електромагнітних процесів у трифазних електрических колах напівпровідниківих перетворювачів з багатоканальним зонним регулюванням фазних напруг без урахування енергетичних втрат у напівпровідниківих комутаторах для швидкої оцінки впливу параметрів навантаження на рівень і форму вихідної напруги.

Ключові слова: електромагнітні процеси; вихідні напруга та струм; двигун постійного струму; метод багатопараметричних модулюючих функцій.

УДК 621.3.013.22

Аналіз впливу магнітної проникності сталевих елементів залізобетонних конструкцій будинків на рівень ослаблення геомагнітного поля в приміщеннях / С.В. Грецких // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 81-89. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-3944.

Показано, що використання в будівництві стандартного арматурного прокату призводить до небезпечноного ослаблення геомагнітного поля в приміщеннях. Визначено вимоги до магнітної проникності "слабомагнітної" конструкційної сталі ($\mu_n < 70$), застосування якої в житловому будівництві дозволить забезпечити комфортні умови проживання по магнітному полю.

Ключові слова: магнітна проникність, конструкційна сталь, ослаблення геомагнітного поля, залізобетонні будівельні конструкції.

УДК 621.039.624

Розрахунок і модифікація магнітної системи для сепараційних експериментів / В.Б. Юферов, В.В. Катречко, С.В. Шарий, Т.І. Ткачова, О.С. Свічкар, М.О. Швець, В.О. Ільїчова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 90-98. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Наведені топографія та осьовий розподіл магнітного поля установки для магнітоплазмового поділу заряджених частинок по масам "ДІС-1" з урахуванням впливу магнитопроводів і власного магнітного поля плазмового джерела, а також удосконаленої конфігурації магнітної системи установки. Показано, що при односторонньому включені магнітних систем установки і плазмового джерела в області іонізації створюється магнітна пробка. Запропоновано варіант конструкції установки для магнітоплазмового поділу елементів ВЯП.

Ключові слова: відпрацьоване ядерне паливо, магнітоплазмовий метод, щільність плазми, магнітна пробка, сепаратор.

УДК 621.039.624

Розрахунок руху заряджених частинок у схрещених полях / В.Б. Юферов, Т.І. Ткачова, С.В. Шарий, О.С. Свічкар, В.В. Катречко, В.О. Ільїчова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 99-109. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Наведені результати розрахунку руху заряджених частинок у схрещених електричному та магнітному полях у наближенні однієї частинки. Враховані параметри магнітного та електричного полів установки для розділення заряджених частинок (магнітоплазмового сепаратора). В якості заряджених частинок розглядалися однозарядні іони Ag, Kr та Xe. Параметри, що змінювались у розрахунках, враховують розкид ряду початкових умов в експериментах, що проводяться.

Ключові слова: сепаратор, щільність плазми, іон, дрейф, система рівнянь, траєкторія руху.

УДК 519.6

Модифіковані робастні гребневі оцінки для визначення викидів / В.І. Грициук // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 110-119. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

Оцінки найменших квадратів (LSE), у множинній лінійній регресії, коли провісники сильно корельовані, дають низьку точність передбачення. Гребенева регресія, будучи регуляризованою версією регресії на основі найменших квадратів, ґрунтуючись на мінімізації квадратичної функції втрат, чутлива до викидів. Розглянуто гладко зниженні ψ -функції, які призводять до асимптотично ефективних оцінок. Для отримання результируючих робастних

гребеневих оцінок, для виявлення викидів використовується метод ітеративно розважених найменших квадратів (IRLS) на основі розглянутої ψ -функції. Результати моделювання підтверджують отримані теоретичні висновки. Отримана збіжність до підсумкових оцінок коефіцієнтів з меншою кількістю ітерацій, ніж без застосування гребеневої регресії. Об'єднані робастні та гребеневі оцінки дозволяють отримати стабільні коефіцієнти і залишки, які допомагають визначити істинні коефіцієнти і викиди.

Ключові слова: М-оцінки, робастні гребеневі оцінки.

УДК 620.179.14

Застосування струмовихревого частотного балансу для контролю властивостей матеріалів накладними перетворювачами / В.Ф. Безотосний, В.В. Козлов, О.В. Набокова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 120-125. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

У роботі показано, що електромагнітні перетворювачі, які засновані на використанні струмовихревого частотного балансу, дозволяють практично повністю позбутися впливу повітряних зазорів між перетворювачем і контролюваною деталлю. Їх можна успішно використовувати для контролю електромагнітних властивостей феромагнітних матеріалів за частотою балансу. Це дозволяє безпосередньо без проміжних перетворень використати цифрову вимірювальну апаратуру.

Ключові слова: струмовихревий перетворювач, струмовихревий частотний баланс, феромагнітні матеріали, електромагнітні властивості.

УДК 621.355.1

Використання діагностичних даних головних приводів прокатних станів в автоматичних системах вимірювання довжини прокату / А.І. Важинський, О.А. Гусев // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 126-131. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведено дослідження системи вимірювання довжини прокату в сортопрокатному цеху. Запропоновано комплекс, заснований на математичній моделі процесу прокатки і діагностичних даних приводу стану 650. У статті наводиться опис математичного моделювання системи управління комплексом. Отримані теоретичні результати послужили основою при реалізації підсистеми вимірювання.

Ключові слова: математична модель, вимірювання довжини, головний привід, масштабування, система візуалізації.

УДК 621.34.52

Релейне керування вихідної напруги автономного джерела електро живлення для газотранспортних мереж / О.М. Моісеєв, В.В. Воінов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і

апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 132-137.
– Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

Представлена система релейного регулювання автономного джерела електро живлення для газотранспортних мереж. Складена розрахункова схема системи автоматичного керування, визначена залежність частоти переключення релейного регулятора в залежності від коєфіцієнту навантаження.

Ключові слова: автономне джерело електро живлення, асинхронний генератор, релейний регулятор, конденсаторне самозбудження.

РЕФЕРАТЫ

УДК 621.316.13: 621.316.95

Повышение надежности защиты электрических сетей бытового назначения за счет использования комплексных критериев срабатывания защитных аппаратов / И.С. Варшамова, А.Г. Середа, Н.Г. Фонта // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків : НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 3-19. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-3944.

Показаны необходимость и возможность повышения надежности защиты электрических сетей бытового назначения за счет перехода к комплексным критериям срабатывания защиты, сформированным из совокупности нескольких параметров защищаемой электрической цепи. Повышение надёжности обеспечивается как за счет расширения перечня аварийных ситуаций в электрической сети, на которые реагирует защита, так и за счет повышения показателя безотказности работы системы защиты, в результате реализации режима резервирования отказов. Проанализированы новые технические решения, позволяющие формировать в режиме скользящего мониторинга различные типы комплексных критериев срабатывания тех или иных видов защит путем использования одинаковых, простых для вычислений и широко используемых в расцепителях выключателей алгоритмов интегрирования квадратов дискретных значений тока.

Ключевые слова: защита, электрическая сеть, скользящий мониторинг, критерии срабатывания.

УДК 681.58: 681.32

Автоматизация управления питательными насосами энергоблока мощностью 200 МВт / В.С. Выговский, Ю.С. Грищук // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 20-31. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведен обзор и анализ систем управления и релейной защиты питательных насосов и технических требований к ним. Обоснована возможность замены релейной системы управления на автоматизированную систему на базе микроконтроллера МК51. Разработана структурная схема автоматизированной системы управления питательными насосами энергоблока и выбраны ее элементы. Построен алгоритм работы схемы автоматизированной системы управления работой питательных насосов и их защитой.

Ключевые слова: энергоблок, питательные насосы, автоматизированная система управления, микроконтроллер.

УДК 621.316

Требования к контактным материалам коммутационных устройств / О.Г. Волкова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення

електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків : НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 32-35. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-3944.

Предложено перейти от использования в конструкциях сильноточных электрических аппаратов медных сплавов в качестве электроконтактных материалов на порошковые материалы. Представлен анализ состава порошкового материала и даны рекомендации по количественному составу легирующих компонентов в структуре медной матрицы. Отмечено, что сложное легирование медной порошковой матрицы проявляется эффектом синергетики, обусловленной каркасной структурой из легирующих компонентов, что придает образованным твердым растворам при достаточной пластичности более высокую прочность.

Ключевые слова: электрические контакты, порошковый материал, легирующий компонент, твердая смазка, электропроводность, теплопроводность.

УДК 621.3

Методика конечноэлементного анализа теплового состояния индукционной кухонной плиты и нагреваемой посуды / М.Г. Пантелят, А.В. Трофімов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми уdosконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

В статье предложена методика численного анализа тепловых процессов в основных конструктивных элементах индукционных кухонных плит и в нагреваемой посуде. Математическая модель распределения температурного поля в рассматриваемых конструкциях представляет собой нестационарное уравнение теплопроводности с граничными условиями, описывающими конвективный теплообмен с окружающей средой. Расчет выполняется в двухмерной постановке методом конечных элементов. В общем случае, учитываются зависимости теплофизических свойств материалов от температуры.

Ключевые слова: индукционная кухонная плита, тепловое поле, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

УДК 621.313:536.2.24:539.2

Влияние числа радиальных разрезов ферромагнитного экрана на показатели линейного индукционно-динамического преобразователя / В.Ф. Болюх, С.В. Олексенко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми уdosконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 45-60. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

Предложена концепция линейного индукционно-динамического преобразователя (ЛИДП), у которого ферромагнитный экран (ФЭ) выполнен с радиальными разрезами. Установлено, что при увеличении количества разрезов уменьшаются индуцированные токи в ФЭ и увеличивается электродинамическая сила, действующая на якорь ЛИДП. Оптимальным

является ФЭ с четырьмя радиальными разрезами. КПД ЛИДП с таким ФЭ повышается на 45 % по сравнению с КПД преобразователя с массивным ФЭ. В результате экспериментальных исследований установлено, что наличие четырех радиальных разрезов в ФЭ увеличивает скорость якоря на 47 %.

Ключевые слова: линейный индукционно-динамический преобразователь, ферромагнитный экран, радиальные разрезы, экспериментальные исследования.

УДК 621.316.91

Проблематика использования асинхронных генераторов на ветроэлектростанциях и их моделирование / В.С. Марков, І.В. Поляков, С.М. Кожемякін // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 61-74. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

В статье рассмотрены проблемы использования асинхронных генераторов на ветроэлектростанциях. В частности – возбуждение этих генераторов, выбор емкостей возбуждения и корректирующих емкостей, стабилизация напряжения генератора под нагрузкой, переходные процессы в асинхронном генераторе на ветроэлектростанции. Рассматриваются модели асинхронного генератора на ветроэлектростанции для компьютерного моделирования.

Ключевые слова: асинхронный генератор, ветроэлектростанция, проблемы асинхронных генераторов, компьютерное моделирование асинхронного генератора на ветроэлектростанции.

УДК 621.314

Исследование электромагнитных процессов в полупроводниковом преобразователи с семизонной регулировкой выходного напряжения и электромеханической нагрузкой / В.В. Михайленко // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 75-80. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-3944.

Разработано новые математические модели электромагнитных процессов в трехфазных электрических цепях полупроводниковых преобразователей с многоканальным зонным регулированием фазных напряжений без учета потерь в полупроводниковых коммутаторах для быстрой оценки влияния параметров нагрузки на уровень и форму выходного напряжения.

Ключевые слова: электромагнитные процессы; выходные напряжение и ток; двигатель постоянного тока; метод многопараметрических модулирующих функций.

УДК 519.2

Аналіз впливання магнітної проницаемості сталевих елементов жалезобетонних конструкцій домов на рівень ослаблення геомагнітного поля в помешканнях / С.В. Грецких // Вісник НТУ "ХПІ".

Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 81-89. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-3944.

Показано, что использование в строительстве стандартного арматурного проката приводит к опасному ослаблению геомагнитного поля в помещениях. Определены требования к магнитной проницаемости "слабомагнитной" конструкционной стали ($\mu_h < 70$), применение которой в жилищном строительстве позволит обеспечить комфортные условия проживания по магнитному полю.

Ключевые слова: магнитная проницаемость, конструкционная сталь, ослабление геомагнитного поля, железобетонные строительные конструкции.

УДК 621.039.624

Расчёт и модификация магнитной системы для сепарационных экспериментов / В.Б. Юферов, В.В. Катречко, С.В. Шарый, Т.И. Ткачева, А.С. Свичкарь, М.О. Швец, В.О. Ильичева // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 90-98. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Приведены топографии и осевые распределения магнитного поля установки для магнитоплазменного разделения заряженных частиц по массам "ДИС-1" с учетом влияния магнитопроводов и собственного магнитного поля плазменного источника, а также усовершенствования конфигурации магнитной системы установки. Показано, что при одностороннем включении магнитных систем установки и плазменного источника в области ионизации создаётся магнитная пробка. Предложен вариант конструкции установки для магнитоплазменного разделения элементов ОЯТ.

Ключевые слова: отработанное ядерное топливо, магнитоплазменный метод, плотность плазмы, магнитная пробка, сепаратор.

УДК 621.039.624

Расчет движения заряженных частиц в скрещенных полях / В.Б. Юферов, Т.И. Ткачева, С.В. Шарый, А.С. Свичкарь, В.В. Катречко, В.О. Ильичева // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 99-109. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-3944.

Приведены результаты расчета движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях в одночастичном приближении. Учтены параметры магнитного и электрического полей установки по разделению заряженных частиц (магнитоплазменного сепаратора). В качестве заряженных частиц рассматривались однозарядные ионы Ar, Kr и Xe. Изменяемые в расчетах параметры учитывают разброс ряда начальных условий в проводимых экспериментах.

Ключевые слова: сепаратор, плотность плазмы, ион, дрейф, система уравнений, траектория движения.

УДК 519.6

Модифицированные робастные гребневые оценки для определения выбросов / В.И. Грицюк // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми уドосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 110-119. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

Оценки наименьших квадратов (LSE), в множественной линейной регрессии, когда предсказатели сильно коррелированы, дают низкую точность предсказания. Гребневая регрессия, являясь регуляризованной версией регрессии на основе наименьших квадратов, основываясь на минимизации квадратичной функции потерь, чувствительна к выбросам. Рассмотрены сглажено сниженные ψ -функции, которые приводят к асимптотически эффективным оценкам. Для получения результирующих робастных гребневых оценок для выявления выбросов используется метод итеративно ревзвешенных наименьших квадратов (IRLS) на основе рассмотренной ψ -функции. Результаты моделирования подтверждают полученные теоретические выводы. Получена сходимость к итоговым оценкам коэффициентов с меньшим количеством итераций, чем без применения гребневой регрессии. Объединенные робастные и гребневые оценки позволяют получить стабильные коэффициенты и остатки, которые помогают определить истинные коэффициенты и выбросы.

Ключевые слова: М-оценки, робастные гребневые оценки.

УДК 620.179.14

Применение токовихревого частотного баланса для контроля свойств материалов накладными преобразователями / В.Ф. Безотосний, В.В. Козлов, О.В. Набокова // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми уДосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 120-125. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-3944.

В работе показано, что электромагнитные преобразователи, основанные на использовании токовихревого частотного баланса, позволяют практически полностью избавиться от влияния воздушных зазоров между преобразователем и контролируемой деталью. Их можно успешно использовать для контроля электромагнитных свойств ферромагнитных материалов по частоте баланса. Это позволяет без промежуточных преобразований использовать цифровую измерительную аппаратуру.

Ключевые слова: токовихревой преобразователь, токовихревой частотный баланс, ферромагнитные материалы, электромагнитные свойства.

УДК 621.355.1

Использование диагностических данных главных приводов прокатных станов в автоматических системах измерения длины проката/ А.И. Важинский, А.А. Гусев // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми уДосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 126-131. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-3944.

Проведено исследование системы измерения длины проката в сортопрокатном цехе. Предложен комплекс, основанный на математической модели процесса прокатки и диагностических данных привода стана 650. В статье приводится описание математического моделирования системы управления комплексом. Полученные теоретические результаты послужили основой при реализации подсистемы измерения.

Ключевые слова: математическая модель, измерение длины, главный привод, масштабирование, система визуализации.

УДК 621.34.52

Релейное регулирование выходного напряжения автономного источника электропитания для газотранспортных сетей / А.Н. Моисеев, В.В. Воинов // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 131-137. – Бібліogr.: 6 назв. – ISSN 2079-3944.

Представлена система релейного регулирования автономного источника электропитания для газотранспортных сетей. Составлена расчетная схема системы автоматического регулирования, определена зависимость частоты переключения релейного регулятора в зависимости от коэффициента нагрузки.

Ключевые слова: автономный источник электропитания, турбогенератор, асинхронный генератор, релейный регулятор, конденсаторное самовозбуждение.

ABSTRACTS

Improving the reliability of protection of household electric networks by using complex criteria of actuation protective devices / I.S. Varshamova, O.G. Sereda, N.G. Fonta // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 3-19. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-3944.

The necessity and possibility of increasing the reliability of protection of household electrical networks due to the transition to comprehensive criteria of tripping formed from a combination of several parameters of the protected circuit are shown. Improving reliability is ensured both by expanding the list of emergency in the power grid, on which protection reacts, and by increasing the uptime of the protection system as a result of redundancy mode failures. New technical solutions permitting to form in a sliding mode monitoring various types of complex criteria for triggering of certain types of protection, using the same, simple in computing and widely used in circuit breakers trip units integration algorithms of square of discrete current values are considered.

Keywords: protection, electric network, sliding mode monitoring, criteria of actuation.

Automation of control by feed-pumps of a 200 MW power unit / B.S. Vigovskij, Yu.S. Grishuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 20-31. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-3944.

A review and analysis of control systems and relay protection of feed-pumps and technical requirements of them are carried out. Possibility of replacement of the relay control system is reasonable to the automatic system on the base of MK51 microcontroller is substantiated. A flow diagram of the automatic control system is developed for the feed-pumps of power unit and its elements are chosen. An algorithm of operation of circuit of the automatic control system for operation of feed-pumps and their protection is built.

Keywords: power unit, feed-pumps, automatic control system, microcontroller.

Requirements for contact materials of switching devices / O.G. Volkova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 32-35. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-3944.

It is proposed to move from use in the construction of high-current electrical apparatus of copper alloys as electrical contact materials to powder materials. An analysis of the composition of the powder material is presented, recommendations on the quantitative composition of the alloying components in the structure of the copper matrix are given. It is noted that complex alloying copper powder matrix is manifested by synergetic effect due to the carcass structure of the alloying

components, which gives higher strength of formed solid solutions with sufficient plasticity.

Keywords: electrical contacts, powder material, the alloying component, a solid lubricant, electrical conductivity, thermal conductivity.

A fe technique for induction cooker and heated dishes thermal state computer simulation / M.G. Pantelyat, A.V. Trofimov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 36-44. – Bibliogr.: 64. – ISSN 2079-3944.

In the paper a technique for the numerical analysis of the induction cooker main structural parts and heated dishes thermal field is proposed. The mathematical model of the temperature field distribution in structures under consideration represents a transient heat transfer equation with boundary conditions describing the heat convection. Calculations are carried out in 2D formulation by the Finite Element Method. In the general case, temperature dependences of thermal properties of materials are taken into account.

Keywords: induction cooker, thermal field, computer simulation, the Finite Element Method.

Influence of number of radial slits of ferromagnetic screen on linear induction-dynamic transducer attributes / V.F. Bolukh, S.V. Oleksenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 45-60. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-3944.

Proposed the concept of a linear induction-dynamic transducer (LIDT) in which ferromagnetic screen (FS) is provided with radial slits. It was found that an increase in the number of radial slits decreases the induced currents in the FS and increases electrodynamic force acting on the armature LIDT. FS is optimal with four radial slits. LIDT efficiency increases with the FS by 45 % compared to the efficiency of the FS inverter and massive. As a result of experimental studies found the presence of four radial cuts in PV increases the speed of the armature 47 %.

Key words: linear induction-dynamic transducer, ferromagnetic screen, radial slits, experimental studies

Problematic use of asynchronous generators for wind farms and their modeling / V.S. Markov, I.V. Polyakov, S.M. Kozhemyakin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 61-74. – Bibliogr.: 16. – ISSN 2079-3944.

In the article some problems of asynchronous generators in wind turbine electric plants have been considered. Particularly there are the generators excitement, exciting and correction capacitances, voltage stabilization of the generator and transient process of them. The models of asynchronous generators in wind turbine electric plants to be needed for computation have been viewed.

Key words: asynchronous generators, wind turbine electric plants, problems of asynchronous generators, computer simulation of asynchronous generators in wind turbine electric plants.

Investigation of electromagnetic processes in a semiconductor converter with seven-zone regulation of output voltage and electromechanical load / V.V. Mikhaylenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. Theory and Practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 75-80. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-3944.

New mathematical models of the electromagnetic processes in three-phase electric circuits of the semiconductor converters with many-server zoned regulation of phases voltages disregarding losses in semiconductor commutators for quick estimation of the influence of parameter of loads on the level and shape of the output voltage are developed.

Key words: electromagnetic processes; the output voltage and current; the DC motor; method of multivariable modulating functions.

Analysis of the influence of the magnetic permeability of the steel reinforced concrete structures on the level of the geomagnetic field inside premises / S.V. Gretskykh // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 81-89. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-3944.

It is shown that the use in the construction of standard reinforcing bars leads to a dangerous weakening of the geomagnetic field on the premises. The requirements for the magnetic permeability "weakly magnetic" structural steel ($\mu_h < 70$) are established. The use of these requirements in residential construction will provide comfortable accommodation in the magnetic field.

Keywords: magnetic permeability, structural steel, the weakening of the geomagnetic field, reinforced concrete constructions.

Calculation and modification in the magnetic separation system for experiments / V.B. Yuferov, V.V. Katrachko, S.V. Shariy, T.I. Tkachova, O.S. Svickar, M.O. Shvets, V.O. Ilichova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 90-96. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-3944.

The topography and axial distributions of the magnetic field of the device for magneto-separation of charged particle mass "DIS-1" taking into account the magnetic cores and the magnetic field of the plasma source, as well as improved configuration of the magnetic system installation are presented. It is shown that at the turn-on of a unidirectional magnetic systems installation and plasma source in the ionization region a magnetic mirror is created. A variant of the design of the facility for spent fuel elements for magnetic separation is proposed.

Keywords: spent nuclear fuel, magnetoplasma method, the plasma density, magnetic mirror, separator.

The calculation of the motion of charged particles in crossed fields / V.B. Yuferov, T.I. Tkachova, S.V. Shariy, O.S. Svirchkar, V.V. Katrechko, V.O. Ilichova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 97-106. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-3944.

The results of the calculation of the motion of charged particles in crossed electric and magnetic fields in particle approximation are shown. The parameters of magnetic and electric fields of installation for charged particles separation (magnetoplasma separator) are taken into account. Singly charged ions of Ar, Kr and Xe are considered as charged particles. The parameters changing in the calculation take into account the variation of a number of initial conditions in the experiments.

Keywords: separator, the plasma density, ion, drift, the system of equations, the motion trajectory.

Modified robust ridge estimates to determine outliers / V.I. Gritsyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 107-115. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-3944.

Least squares estimates (LSE), in a multiple linear regression when the predictors are strongly correlated, give low prediction accuracy. Ridge regression, being regularized version of the regression based on least squares based on the minimization of a quadratic loss function, sensitive to outliers. Smoothly redescending ψ -functions, which lead to asymptotically efficient estimates are considered. The Iteratively Re-weighted Least Squares (IRLS) method based on the considered ψ -functions is used to obtain the resulting robust ridge estimates to detect outliers. Simulation results confirm the received theoretical conclusions. The convergence is obtained to the final estimates of the coefficients with smaller number of iterations than without using ridge regression. The combined robust ridge estimates allow to obtain stable coefficients and residuals which help in determining true coefficients and outliers.

Keywords: M-estimates, robust ridge estimates.

Application токовихревого frequency balance for monitoring of material properties by unprofitable converters / V.F. Bezotosnyj, V.V. Kozlov, O.V. Nabokova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 116-121. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-3944.

It is shown that electromagnetic converters based on the use of eddy-current frequency balance, allow almost completely to get rid of the influence (effect) of air gaps between the converter and a controllable detail. They may be used successfully for monitoring of electromagnetic properties of ferromagnetic materials on

frequency balance. It allows the use of digital metering equipment without intermediate transformations.

Keywords: eddy-current converter, eddy-current frequency balance, ferromagnetic materials, electromagnetic properties.

Use of diagnostic data of the main drives of the rolling mills in automatic measurement systems of products length measurement / A.I. Vazhinsky, A.A. Gusev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 122-127. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-3944.

The study of measuring system was carried out in rolling shop. The complex was proposed based on a mathematical model of the rolling process and 650 mill diagnostic data. The paper describes mathematical modeling of a complex control systems. The theoretical results obtained is served as the basis for implementation of the measuring subsystem.

Keywords: mathematical model, length measurement, the main drive, scaling, visualization system.

Relay adjusting of output tension of autonomous source of power supply for gas-transport networks / A. Moiseiev, V. Voinov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of electrical machines and apparatus perfection. The theory and practice. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 13 (1122). – P. 128-132. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-3944.

The system of the relay adjusting of autonomous source of power supply is presented for gas-transport networks. The calculation chart of the system of automatic control is made, dependence of frequency of switching of relay regulator is determined depending on the coefficient of loading.

Keywords: autonomous source of power supply, asynchronous generator, relay regulator, capacitor self-exiting.

ЗМІСТ

ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

ВАРШАМОВА І.С., СЕРЕДА О.Г., ФОНТА Н.Г.

Підвищення надійності захисту електричних мереж побутового призначення за рахунок використання комплексних критеріїв спрацювання.....3

ВИГОВСЬКИЙ В.С., ГРИЩУК Ю.С.

Автоматизація керування живильними насосами енергоблоку потужністю 200 МВт.....20

ВОЛКОВА О.Г.

Требования к контактным материалам коммутационных устройств.....32

ПАНТЕЛЯТ М.Г., ТРОФІМОВ А.В.

Методика скінченоелементного аналізу теплового стану індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається36

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

БОЛЮХ В.Ф., ОЛЕКСЕНКО С.В.

Влияние числа радиальных разрезов ферромагнитного экрана на показатели линейного индукционно-динамического преобразователя.....45

МАРКОВ В.С., ПОЛЯКОВ И.В., КОЖЕМЯКИН С.М.

Проблематика использования асинхронных генераторов на ветроэлектростанциях и их моделирование.....61

МИХАЙЛЕНКО В.В.

Дослідження електромагнітних процесів у напівпровідниковому перетворювачі з семизонним регулюванням вихідної напруги і електромеханічним навантаженням.....75

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ

ГРЕЦКИХ С.В.

Анализ влияния магнитной проницаемости стальных элементов железобетонных конструкций домов на уровень ослабления геомагнитного поля в помещениях81

СИЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТА МАГНІТНІ ПОЛЯ

ЮФЕРОВ В.Б., КАТРЕЧКО В.В., ШАРЫЙ С.В., ТКАЧЕВА Т.И.,

СВИЧКАРЬ А.С., ШВЕЦ М.О., ИЛЬЧЕВА В.О.

Расчет и модификация магнитной системы для сепарационных экспериментов90

| | |
|---|-----|
| ЮФЕРОВ В.Б., ТКАЧЕВА Т.И., ШАРЫЙ С.В., СВИЧКАРЬ А.С., КАТРЕЧКО В.В., ИЛЬЧЕВА В.О. | |
| Расчет движения заряженных частиц в скрещенных полях | 97 |
| <hr/> | |
| КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ | |
| ГРИЦЮК В.И. | |
| Модифицированные робастные гребневые оценки для определения выбросов..... | 107 |
| <hr/> | |
| ПРИСТРОЇ ТА МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ | |
| БЕЗОТОСНЫЙ В.Ф., КОЗЛОВ В.В., НАБОКОВА О.В. | |
| Применение токовихревого частотного баланса для контроля свойств материалов накладными преобразователями | 116 |
| <hr/> | |
| ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЙ | |
| ВАЖИНСКИЙ А.И., ГУСЕВ А.А. | |
| Использование диагностических данных главных приводов прокатных столов в автоматических системах измерения длины проката | 122 |
| МОИСЕЕВ А.Н., ВОИНОВ В.В. | |
| Релейное регулирование выходного напряжения автономного источника электропитания для газотранспортных сетей | 128 |
| РЕФЕРАТИ..... | 133 |
| РЕФЕРАТЫ..... | 139 |
| ABSTRACTS | 145 |

Наукове видання

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
"ХПІ"**

Збірник наукових праць

Серія

**Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів.
Теорія і практика**

№ 13 (1122) 2015

Відповідальний редактор д.т.н., проф. *Б.В. Клименко*

Технічний редактор: *Н.В. Себякіна*

Відповідальний за випуск к.т.н. *І.Б. Обухова*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЙ:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21. НТУ "ХПІ"

Кафедра "Електричні апарати". Тел. (057) 707-69-76

E-mail: varshamova_i@rambler.ru

Обл.-вид. № 10-15

Підп. до друку 24.03.2015 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний. Riso-друк.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 8,75. Наклад 300 прим., 1-й з-д 1-80.

Зам. № 100. Ціна договірна.

Видавець і виконавець
Видавничий центр НТУ "ХПІ",
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.